



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE PREDICCIÓN DE CORRIENTES EN EL PUERTO DE BILBAO

Trabajo realizado por:

**José Solá Gomeza**

Dirigido por:

**Agustín Sánchez-Arcilla**

**Pablo Cerralbo**

Grado en:

**Ingeniería Civil**

Barcelona, 29 de septiembre de 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

## ABSTRACT

For the port activity to develop in an adequate way it is necessary to have information on the water quality and state: information on the currents, on the temperature or on the salinity of the harbour inside water.

In the case of Spain, Puertos del Estado (the Spanish Public State Port Agency) developed an initiative called SAMOA (*Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico de la Autoridad Portuaria*). SAMOA was created to improve and increase the available information of the interior water state of the Spanish ports and later to provide it to the different port authorities. This initiative supplied a series of services and, between them, a high-resolution prediction model at a coastal and port scale.

This document introduces a methodology to validate this high-resolution prediction model applied to the Bilbao port. Then, uses it to validate the model and evaluates the quality of the predictions. The variables used to this aim are the water current speed and the sea level. The described methodology compares the predictions of the model with real data obtained with different sensors installed in the port by means of two statistical metrics. This methodology is also applicable to other ports with SAMOA operative.

The results obtained show that the model can predict the sea level very well, providing very high correlations (close to 0.9), especially for the astronomical component, with a correlation value greater than 0.95. However, it fails slightly when predicting the currents. The correlations obtained for the currents range between 0.3 and 0.6 in absolute value. Regarding the main current directions, the prediction fits well with reality. Generally, the model predicts the astronomical part of the currents in the North direction very well (correlations from 0.8 onwards). However, it fails to predict the East direction. The prediction of the residual current is worse than the astronomical one, with correlations of 0.1 to 0.4. The validation of the external sensor data is much better than the internal sensors.

Finally, this document proposes a series of upgrades both for the prediction model and for perfecting the validation work. The improvements that stand out for the prediction model are improvements in atmospheric forcing, freshwater forcing and bathymetry. For the validation work, it is proposed to have measured wind data, freshwater discharge, measured temperature and salinity to allow a more in-depth analysis of the results.

## RESUMEN

Para que dentro de los puertos la actividad portuaria pueda transcurrir de una manera adecuada es necesario disponer de información del estado y calidad del agua; información de las corrientes, de la temperatura o de la salinidad de las aguas del interior del puerto.

En el caso de España, Puertos del Estado desarrolló una iniciativa llamada SAMOA (*Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico de la Autoridad Portuaria*) para mejorar y ampliar la información disponible del estado del agua del interior de los puertos españoles y facilitarla a las diferentes autoridades portuarias. Esta iniciativa proporcionaba una serie de servicios y, entre ellos, un modelo de predicción de alta resolución a escala costera y portuaria.

Este documento introduce una metodología para validar el modelo de predicción aplicado al puerto de Bilbao (aplicable también a otros puertos con SAMOA operativo), usando las variables de velocidad de corriente y nivel del mar y la emplea para dar unas valoraciones sobre la calidad de las predicciones. La metodología desarrollada compara las predicciones del modelo con datos reales obtenidos por diferentes sensores distribuidos en el puerto mediante unas métricas estadísticas.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo es capaz de predecir el nivel del mar excelentemente, proporcionando unas correlaciones muy altas (cercanas a 0.9), sobre todo para la componente astronómica, con correlaciones de más de 0.95. No obstante, falla levemente al predecir las corrientes. Las correlaciones obtenidas para las corrientes oscilan entre 0.3 y 0.6 en valor absoluto. Respecto a las direcciones principales de corriente, la predicción se ajusta bien a la realidad. Por norma general, el modelo predice la parte astronómica de las corrientes en dirección Norte muy bien (correlaciones de 0.8 en adelante), pero falla al predecir la dirección Este. La predicción de la corriente residuo es peor que la astronómica, con correlaciones de 0.1 a 0.4. La validación de los datos del sensor exterior es mucho mejor que los sensores interiores.

Finalmente, este documento propone una serie de mejoras tanto para el modelo de predicción como para perfeccionar el trabajo de validación. Las mejoras que destacan para el modelo de predicción son mejoras en el forzamiento atmosférico, en el forzamiento de agua dulce y en la batimetría. Para el trabajo de validación, se propone disponer de datos de viento medidos, descarga de agua dulce, temperatura medida y salinidad para permitir un análisis de los resultados más en profundidad.

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, quiero dar las gracias a ambos tutores, Pablo Cerralbo y Agustín Sánchez-Arcilla, por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo y por haberme proporcionado toda la ayuda durante estos meses.*

*A mi familia, por la ayuda y apoyo incondicional durante toda la carrera, por mostrar interés en el proyecto y por proporcionarme las herramientas y valores necesarios para seguir luchando por mi futuro y a todos mis amigos que me han apoyado en todo momento.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ABSTRACT .....	i
RESUMEN.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	iv
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ESTUDIOS PREVIOS .....	3
2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	3
2.1.1. BREVE HISTORIA DEL PUERTO DE BILBAO .....	5
2.2. LA INICIATIVA SAMOA.....	6
2.3. CAMPAÑAS DE CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL PUERTO DE BILBAO .....	10
3. METODOLOGÍA.....	12
3.1. CONJUNTO DE OBSERVACIONES PARA VALIDACIÓN .....	12
3.2. SIMULACIONES DE LOS MODELOS.....	15
3.3. ANÁLISIS DE DATOS .....	17
3.3.1. TRATAMIENTO DE LOS DATOS DE LAS CAMPAÑAS .....	17
3.3.2. COMPARACIÓN DE LOS DATOS .....	19
3.3.3. DESCOMPOSICIÓN POR ARMÓNICOS .....	20
4. OBTENCIÓN DE RESULTADOS .....	22
4.1. INT2 .....	22
4.2. ENT1 .....	34
4.3. INT1 .....	39
5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	52
5.1. INT2 .....	53
5.2. ENT1 .....	54
5.3. INT1 .....	55
6. CONCLUSIONES.....	58
7. BIBLIOGRAFÍA .....	61

## 1. INTRODUCCIÓN

En una época muy marcada por la globalización, el crecimiento del transporte marítimo de personas y, sobre todo de mercancías, ha aumentado drásticamente debido a su capacidad de transportar gran cantidad de bienes a largas distancias a un precio muy competitivo. En el año 2017, el Sistema Portuario español movió un total de 545.2 millones de toneladas de mercancía, un incremento anual de cerca de +7.4% respecto al año 2016 y un crecimiento en el período 2013-2017 de +19.4%<sup>1</sup>.

Este crecimiento se traduce en un aumento proporcional de entrada y salida de buques en los puertos generando un incremento de tránsito que hace que sea importante conocer y entender el comportamiento físico de las áreas costeras y portuarias sujetas a este fenómeno. Además, la Unión Europea, en el año 2000, dictó una normativa referente a la protección de las aguas continentales, subterráneas y costeras (2000/60/CE WFD; [http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index\\_en.html](http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html)).

La actividad portuaria puede afectar de una manera muy negativa a la calidad del agua del interior del puerto y de la costa adyacente. Por esto, en la Directiva Europea se indicaba, entre otras cosas, que las autoridades portuarias eran directamente responsables de la calidad del agua en términos de contaminación y de minimizarla (Darbra *et al.* 2009). Estos cambios en la calidad del agua debidos a actividades antropogénicas pueden afectar a otros tipos de actividades como la pesca recreativa o el baño.

Una variable de alta relevancia dentro de un puerto es la capacidad de éste para renovar el agua de su interior. Se han realizado muchos estudios sobre este factor, entre ellos destaca el de Grifoll *et al.* 2013, en el que se analiza la renovación del agua dentro del puerto de Bilbao y su inclusión en la evaluación de riesgos de la contaminación del agua. La renovación del agua también es importante en episodios de vertidos contaminantes dentro de las aguas portuarias (Grifoll *et al.* 2010).

Por tanto, para soportar un incremento de la actividad portuaria, es muy importante conocer ciertas variables hidrodinámicas y ser capaz de predecirlas. Tradicionalmente, las variables de interés han sido el viento, las olas o el nivel del mar y recientemente se han incluido las corrientes. La información de las corrientes en el interior de un puerto es crucial tanto para la renovación del agua interior como para operaciones de amarre de grandes buques de mercancías.

Debido a la alta demanda de información de datos de corrientes, la Unión Europea desarrolló a través del programa Copernicus, un programa que proporciona información oceánica actualizada, llamado CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) y que está totalmente operativo desde mayo de 2015. Esta información oceánica viene proporcionada por un modelo de predicción de variables hidrodinámicas del océano.

---

<sup>1</sup> Fuente: Memorias de las Autoridades Portuarias y Anuario Estadístico de Puertos del Estado, año 2017.

Uno de los productos es el CMEMS IBI-MFC (Iberia-Biscay-Ireland Monitoring & Forecasting Centre), que cubre toda la costa atlántica europea y todas las aguas españolas. Tiene una resolución horizontal de  $1/36^\circ$ , alta para aplicaciones regionales, pero baja para caracterizar procesos costeros o portuarios.

Para solucionar este problema, las autoridades portuarias españolas y Puertos del Estado, en colaboración con otras entidades, han estado trabajando durante los últimos años en un modelo de alta resolución con escalas costeras y portuarias capaz de proporcionar información a nivel portuario: la iniciativa SAMOA (Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico de la Autoridad Portuaria) (Álvarez Fanjul *et al.* 2018). El servicio SAMOA consiste en varios módulos y este trabajo se centra sólo en aquellos de implementación de un modelo de predicción de alta resolución. Este modelo proporciona predicciones de variables como nivel del mar, corrientes, temperatura del agua y salinidad con una alta resolución espacial. SAMOA está siendo aplicado en puertos a lo largo de todo el país. Este documento se centra en concreto en la aplicación de SAMOA en el puerto de Bilbao, pero solo a escala portuaria.

El objetivo principal de este trabajo es establecer una metodología y usarla para validar los datos proporcionados por las predicciones del modelo para el puerto de Bilbao y que luego sea fácilmente reproducible en otros puertos. Para este propósito, se han usado unos datos hidrodinámicos facilitados por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM), los cuales han sido obtenidos por una serie de sensores sumergidos durante unas campañas con un objetivo inicial de caracterizar hidrodinámicamente las playas cercanas al puerto de Bilbao. Las variables seleccionadas para la validación han sido las corrientes y el nivel del mar. Anteriormente ya se hizo un trabajo de validación (Sotillo *et al.* 2019), en el que se describe SAMOA y se comparan los datos proporcionados por el modelo con datos de boyas cercanas al puerto. Este documento proporciona un grado de detalle de validación del modelo a nivel portuario que previamente era inexistente.

El presente documento se divide en 5 capítulos. En el primero, dado que se trata del puerto de Bilbao, se hace una descripción del área de estudio y se resume brevemente la historia del puerto. A continuación, se describe la iniciativa SAMOA y posteriormente las campañas de caracterización hidrodinámica usadas para la validación del modelo.

En el siguiente capítulo se describe la metodología usada para validar el modelo: qué datos se han usado, cómo se han tratado y cómo se ha llevado a cabo la comparación. En el capítulo subsecuente, se muestran los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología descrita sobre los datos.

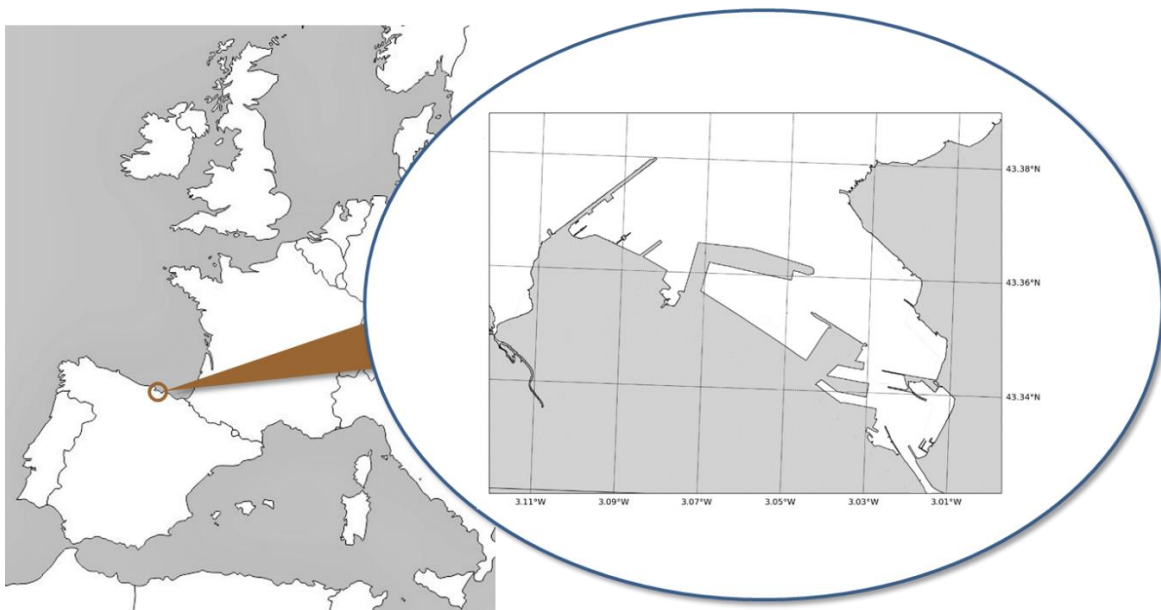
En el penúltimo capítulo se hace una discusión de los datos obtenidos, se cuestiona si la validación es correcta o incorrecta y se valoran los resultados obtenidos. Finalmente, en el último capítulo se recogen las conclusiones del trabajo realizado y se proponen algunas mejoras para el modelo y para una mejor validación del mismo.

## 2. ESTUDIOS PREVIOS

### 2.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Tal y como se ha indicado anteriormente, el área de estudio del proyecto comprende la zona del puerto de Bilbao. Se ubica en el centro del golfo de Vizcaya, en la desembocadura de la ría del Nervión ( $43^{\circ} 22' 43''$  N,  $03^{\circ} 04' 57''$  W). El puerto abarca 350 hectáreas de superficie terrestre y 1971 hectáreas de superficie de flotación. Permite el acceso a barcos de hasta 32 m de calado, tiene un total de 17 km de muelles y cuenta con 250 hectáreas para almacenamiento. Durante muchos años ha sido y sigue siendo el puerto más importante del Norte de España además de ser el quinto más grande a nivel nacional.

La ciudad de Bilbao, que se encuentra a unos pocos kilómetros remontando la ría, es la ciudad más importante de la región. Históricamente ha tenido y todavía actualmente cuenta con un gran tejido industrial, sobre todo industria metalúrgica. El puerto es el más importante de la zona Norte de la península con relación al transporte de crudo y al tráfico de contenedores.



*Figura 2.1. Detalle de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia, informe final de validación del modelo de predicción.*

El puerto se puede dividir en dos zonas: la zona Oeste al estuario que es la terminal comercial del puerto, donde se encuentran gran parte de las industrias y zonas de almacenamiento. Es donde se realizan las operaciones de carga y descarga en los barcos mercantes. En la zona Este se encuentran el Puerto Viejo de Algorta convertido hoy en día en una zona de ocio y recreo, las playas del interior del puerto y varias zonas residenciales. En esta zona también hay una pequeña terminal de pasajeros.





Figura 2.2. Vista general del puerto. Fuente: Puerto de Bilbao.

Respecto a las características oceanográficas, el estuario del Nervión abarca un área de cerca de 20 km<sup>2</sup> con una profundidad media de 30 metros y una longitud de unos 22 km. Tiene un tiempo elevado de residencia, por lo tanto, es muy susceptible de sufrir acumulaciones masivas de fitoplancton y a sufrir eutrofización (Grifoll *et al.* 2009). El caudal medio del río en la desembocadura es de cerca de 36 m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>. La corriente generada por la entrada de la masa de agua dulce aparece normalmente en la zona Este del estuario (Franco *et al.* 2002). El agua dulce entrante genera una estratificación halina entre las aguas superficiales y profundas, cosa que hace que aparezca una termoclina en profundidades entre 20 y 30 metros. Dependiendo de la época del año, la estratificación está más o menos marcada siendo muy evidente a principios de verano (Grifoll *et al.* 2009).

Las corrientes que se puedan desarrollar en el puerto están muy influenciadas por el régimen de vientos en la zona que suelen ser principalmente de componente Nordeste-Norte-Noroeste y de componente Sur. Los vientos de componente Sur generan fenómenos de surgencias (transportan el agua lejos de la costa y el agua a más profundidad sale a la superficie) y los de componente Norte impiden la circulación del agua hacia fuera del estuario (Grifoll *et al.* 2009).

---

<sup>2</sup> Fuente: Grifoll *et al.* 2009

### 2.1.1. BREVE HISTORIA DEL PUERTO DE BILBAO

La fundación del puerto se remonta al s. XIV, pero la ría ya se utilizaba como refugio antes de que éste fuera construido. Los primeros trabajos de mejora del encauzamiento de la ría y de habilitación del puerto datan del 1511, con la creación del Consulado de Bilbao.

No obstante, la primera gran obra de desarrollo del puerto se realizó coincidiendo con la revolución industrial y el comienzo de la explotación del mineral del hierro (abundante en la zona de Triano). Hubo una gran demanda procedente del extranjero (principalmente de Inglaterra) y, en consecuencia, una gran afluencia de barcos que provocaba que la carga y descarga de material fuese lenta y sufriese numerosas demoras por la dificultad para entrar y salir del puerto. Para darle una solución a este problema, en el año 1877 se creó la Junta de obras del Puerto de Bilbao y en ese mismo año se culminaba la construcción del muelle de hierro de Portugalete que permitía a los buques de gran calado acceder a la ría.

En el año 1902 el puerto llegó al mar al construirse el dique de Santurce y el contramuelle de Algorta, dotándolo ya de una dimensión considerable y situándolo como uno de los grandes puertos del continente.

La siguiente gran obra que se realizó fue ya en el 1975, con la construcción del dique de Punta Lucero y el área marítima conocida como el “Abra Exterior”, de uso principalmente para productos petrolíferos. En el año 1992 esta zona se empezó a desarrollar, habilitando en primer lugar, unos muelles de carga y descarga en la costa y posteriormente, en el 1996, el primer muelle dentro del área del Abra Exterior. En los años sucesivos hasta la actualidad se ha ido desarrollando esta zona. La última obra que se está ejecutando en la actualidad previsiblemente terminará a finales de 2019 (primera fase del espigón central).



Figura 2.3. Detalle de las construcciones en el puerto. Fuente: Elaboración propia, Google Maps.

## 2.2. LA INICIATIVA SAMOA

La iniciativa SAMOA nació de los esfuerzos de Puertos del Estado, junto con las entidades portuarias españolas y otras entidades, para desarrollar un sistema que pudiese proporcionar información oceánica y meteorológica personalizada, tanto de análisis como de predicción, a todos los puertos españoles, con una resolución suficiente. Durante 6 meses, Puertos del Estado colaboró con todas las autoridades portuarias españolas para determinar y definir los principales problemas y carencias que tenían sus instalaciones debido a los fenómenos meteorológicos y oceánicos. Actualmente, un total de 18 autoridades portuarias tienen operativos los servicios proporcionados por SAMOA.

SAMOA consiste en varios módulos: unos están focalizados en proporcionar información casi en tiempo real para mejorar los datos proporcionados por los instrumentos de las redes de observación instalados por Puertos del Estado, y otros están centrados en la implementación de un modelo de predicción de alta resolución (hasta escalas portuarias), de variables atmosféricas y oceánicas, como pueden ser olas, nivel del mar o circulación. La circulación dentro de los puertos es importante debido a que éstos tienen que cumplir una serie de estándares para asegurar una calidad del agua suficiente. El modelo de predicción de corrientes está desarrollado juntamente con el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la UPC. Este trabajo se centra en el modelo de predicción de variables oceánicas.

Durante el desarrollo del modelo, éste ha tenido dos versiones; una de ellas (v1) es una mejora de la primera (v0) dado que ésta última daba errores destacables. En las siguientes páginas se describe el desarrollo de la segunda versión, su validación y se introducen los aspectos más relevantes de la primera versión.

### VERSIÓN v1

Las predicciones que proporciona el modelo tienen un horizonte temporal de tres días. Las aplicaciones del modelo consisten en dos mallas, una a nivel costero y otra a nivel portuario con unas resoluciones espaciales de cerca de 350 m y 70 m, respectivamente. Las predicciones asociadas a cada malla cuentan con tres días de predicción (forecasting: FC01, FC02, FC03), en base a un día de simulación pasada (hindcasting: HC01) para mejorar la predicción futura. En la Figura 2.4 se esquematiza la cadena operacional.

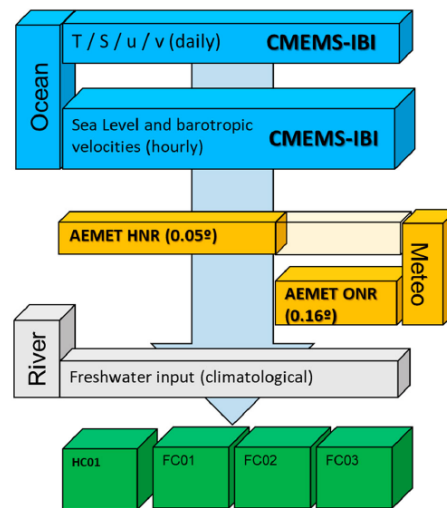
La predicción de las mallas del modelo v1 está anidada sólo al sistema de predicción regional diario CMEMS-IBI. El anidamiento considera todas las variables que aporta el CMEMS-IBI y asegura su consistencia y la consistencia en los contornos del dominio.

El sistema CMEMS IBI-MFC<sup>3</sup> (Copernicus Marine Environment Monitoring Service Iberia-Biscay-Irish – Monitoring & Forecasting Centre) está promocionado por la Unión Europea a

---

<sup>3</sup> Sotillo *et al.* 2015

través del programa Copernicus, y está centrado en la zona costera que va desde la península ibérica hasta Irlanda. IBI-MFC usa un modelo baroclínico hidrodinámico 3D e incorpora datos reales del estado del mar. Trabaja a una resolución espacial  $1/36^\circ$  con un horizonte temporal de predicción de 6 días (D + 5) y proporciona datos de corrientes, salinidad y temperatura.



*Figura 2.4. Esquema de la cadena operativa de la versión v1. Los rectángulos azules hacen referencia a las condiciones de contorno abiertas, los amarillos representan el forzamiento atmosférico, el gris el input de agua dulce y los verdes los rangos de predicción del modelo. Fuente: Sotillo et al. 2019.*

En la superficie del mar, el modelo está forzado con datos de viento horarios, datos de flujos de calor transferidos al océano y datos de presión atmosférica que son proporcionados por AEMET a partir del modelo HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) de predicción meteorológica. Este modelo tiene dos aplicaciones operacionales de diferente resolución: HNR y ONR.

- El HNR, de escala peninsular, tiene una resolución de  $0.05^\circ$  y proporciona predicciones a 36 horas.
- El ONR, de escala euroatlántica, que proporciona predicciones a 72 horas con una resolución de  $0.16^\circ$ .

Dado que la predicción del HNR es de solo 36 horas, para que el modelo del SAMOA pueda realizar predicciones a 72 horas se tienen que incorporar predicciones del ONR, que son de menor resolución. Ambos se usan para obtener el esfuerzo que hace el viento sobre la superficie, el flujo neto de calor y el flujo de salinidad.

A los archivos de forzamiento atmosférico proporcionados por HIRLAM se les aplica una máscara de tierra dónde la predicción del modelo atmosférico en el nodo más cercano al



mar es extrapolado hacia la zona de tierra dado que algunas de las variables de los modelos atmosféricos son muy sensibles a las zonas de transición entre el océano y tierra.

El modelo numérico tridimensional usado para la malla costera y portuaria es el modelo ROMS (Regional Ocean Modelling System), un modelo ampliamente usado y reconocido por la comunidad científica internacional (Juza *et al.* 2016), sobre todo para aplicaciones costeras, pero poco usado para escalas portuarias (Grifoll *et al.* 2016 usaron ROMS para un modelo hidrodinámico 3D).

En la Figura 2.5 se muestran las dos mallas usadas para el modelo hidrodinámico. Las dos mallas están anidadas y el ratio de anidamiento es cercano a 5, el necesario para asegurar una resolución suficiente a la hora de reproducir de una manera correcta la circulación dentro del puerto.

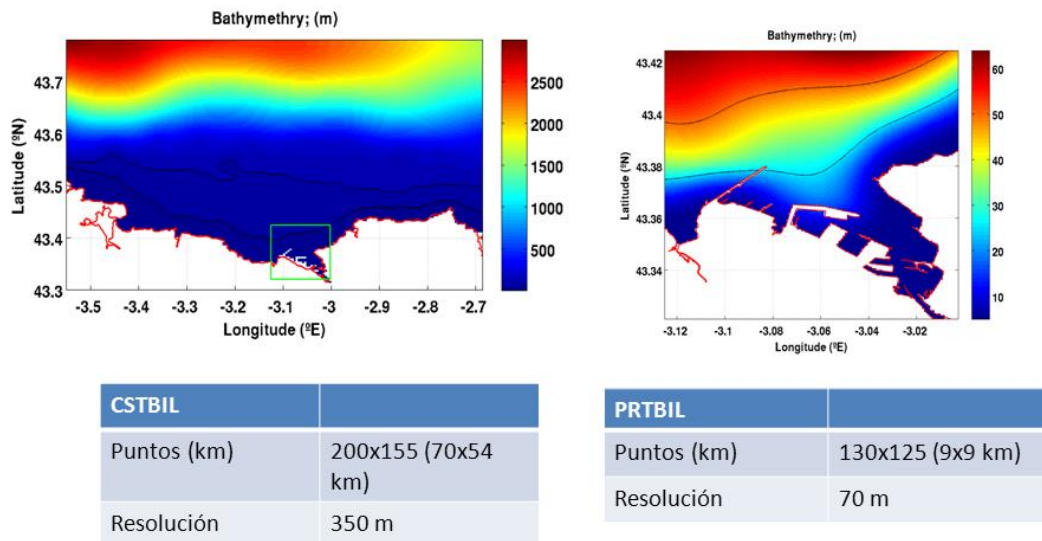


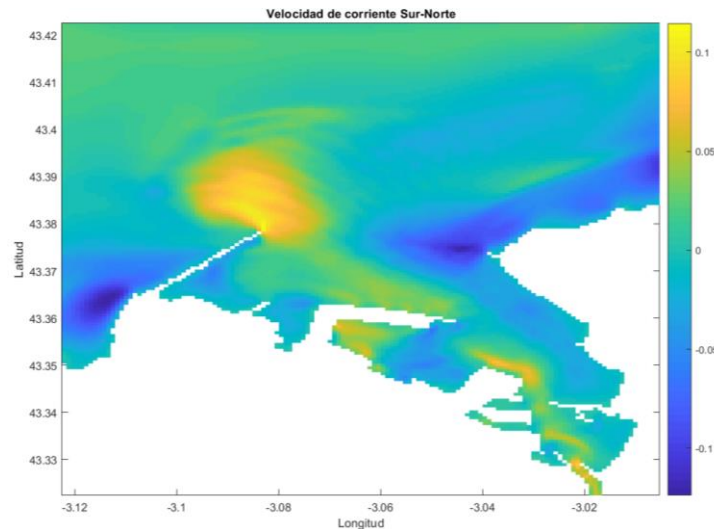
Figura 2.5. Mapa del dominio y de la batimetría de la malla costera (izquierda) y de la malla portuaria (derecha) y algunos datos inherentes a éstas. Fuente: Informe final de validación del modelo de predicción.

Las batimetrías usadas se construyen combinando información proporcionada por GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), que es una organización sin ánimo de lucro que opera promocionada juntamente por la Organización Hidrográfica Internacional (IHO en inglés) y por la Comisión Oceánica Intergubernamental (IOC en inglés, de la UNESCO) y con información proporcionada por las autoridades portuarias.

Las predicciones proporcionadas por CMEMS-IBI se aplican en el modelo de SAMOA como condiciones de contorno abiertas. Los datos medios de corriente, temperatura y salinidad se imponen en la columna de agua como condiciones de contorno Dirichlet. Respecto al aporte de agua dulce de la ría de Bilbao, se consideran valores climatológicos de escorrentía y una salinidad constante de 18 psu.

La resolución espacial de la versión es de  $1/36^\circ$  y la resolución temporal de las variables oscila entre horaria y diaria (la resolución temporal de las corrientes es horaria). El producto

proporciona, como se ha indicado antes, simulaciones a nivel costero y portuario; a nivel costero recibe el nombre de CST-BIL y a nivel portuario de PRT-BIL. En la Figura 2.6 se puede observar un ejemplo de una simulación de corriente a escala portuaria.



*Figura 2.6. Predicción de la componente Sur-Norte de la corriente generada por el modelo para el 12/10/2017 a las 16h.  
 Fuente: Elaboración propia.*

## VALIDACIÓN DE LA VERSIÓN v1

Para la validación, se usaron datos meteo-oceanográficos de diferentes redes de medida de Puertos del Estado. En concreto, los datos de la red exterior (REDEXT), de la red costera (REDCOS) y de la red de mareógrafos (REDMAR).

En la validación de la implementación de los sistemas CST-BIL y PRT-BIL para el nivel del mar se mantuvieron los errores inherentes del sistema regional CMEMS-IBI. El análisis de la marea meteorológica no mostraba un patrón de mejora, por tanto, se pudo afirmar que el esquema de anidamiento mantenía los niveles de correlación del sistema regional, siendo imposible resolver de forma más adecuada la contribución de la marea astronómica.

Respecto a la temperatura superficial, los tres modelos, CMEMS-IBI, CST-BIL y PRT-BIL representaban de forma muy adecuada la variabilidad inter-estacional así como la evolución anual de la temperatura. Estos dos últimos además mostraban una variación de la temperatura diaria muy cercana a la observada.

Finalmente, en relación con las corrientes, a nivel general en el año 2014 las medidas de boyas y las simulaciones de los modelos CMEMS-IBI y CST-BIL presentaban patrones bastante diferentes; ambos modelos subestimaban las corrientes medidas por la boya de la Red Exterior. Además, la alta variabilidad en la dirección de las corrientes medidas por la boya no se representaban correctamente en los modelos.

## VERSIÓN v0

La principal diferencia entre ambas versiones es que la predicción de las mallas de la versión v0 estaba anidada, además de al sistema de predicción regional diario CMEMS-IBI, a un sistema de predicción de la marea astronómica producido por Puertos del Estado (NIVMAR) y la malla en el contorno estaba forzada a la marea proporcionada por el modelo FES (LEGOS).

El resultado de la validación de éste mostraba que se mejoraba la predicción de la altura del nivel del mar en los puertos mediterráneos al validarla con boyas en el interior del puerto; menos afectadas por la marea meteorológica. No obstante, se observaron problemas de continuidad en las zonas de contorno debido al anidamiento de esta versión a NIVMAR y a FES.

## 2.3. CAMPAÑAS DE CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL PUERTO DE BILBAO

Entre marzo de 2017 y junio de 2018 el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC, en colaboración con la autoridad portuaria de Bilbao y Azti Tecnalia realizó una serie de campañas de caracterización hidrodinámica del puerto de Bilbao<sup>4</sup>. El objetivo de estas campañas era obtener datos hidrodinámicos reales de puntos cercanos a las playas del puerto de Bilbao y alrededores

Hubo un total de tres campañas, distribuidas entre las fechas arriba mencionadas. La primera transcurrió entre los meses de marzo y junio del 2017, la segunda entre los meses de octubre y diciembre de 2017 y finalmente la tercera entre abril y junio de 2018. Este trabajo se centra sólo en los datos proporcionados por la campaña de primavera 2018.

En esta campaña se instalaron tres equipos diferentes en tres localizaciones distintas. De estos tres, dos equipos se instalaron dentro de la bahía del puerto y el tercero fuera<sup>5</sup>. Los equipos estuvieron operativos desde abril hasta junio de 2018 excepto uno del interior del puerto, que ya estaba instalado anteriormente como punto fijo de referencia (PFR) desde marzo de 2017. A este equipo se le cambió la batería al inicio de la campaña y se volvió a instalar para que estuviese operativo 6 meses más.

En cada punto de medida los sensores tomaban datos de velocidad de la corriente, del nivel del mar y de la temperatura, entre otros; cada 10 minutos en capas de distinto grosor

---

<sup>4</sup> Dichas campañas se enmarcan en el proyecto “Asistencia técnica para el seguimiento ambiental del proyecto de extracción de arenas en el sector Norte de la zona II de la APB (2016-2020) con especial vinculación al proyecto del espigón central”

<sup>5</sup> Los equipos instalados en el interior tienen de código INTX y los instalados en el exterior ENTX

dependiendo del instrumento que se tratase. Para la campaña de primavera 2018, los instrumentos empleados en las instalaciones fueron:

- 1 perfilador acústico de corrientes y medidor de oleaje de la marca NORTEK, modelo AWAC 1MHz (ver Figura 2.7) para el PFR.
- 2 perfiladores acústicos de corrientes con capacidad de determinar oleaje direccional de la marca NORTEK, modelo AQUADOPP 600KHz (ver Figura 2.8) para los equipos “no fijos”.

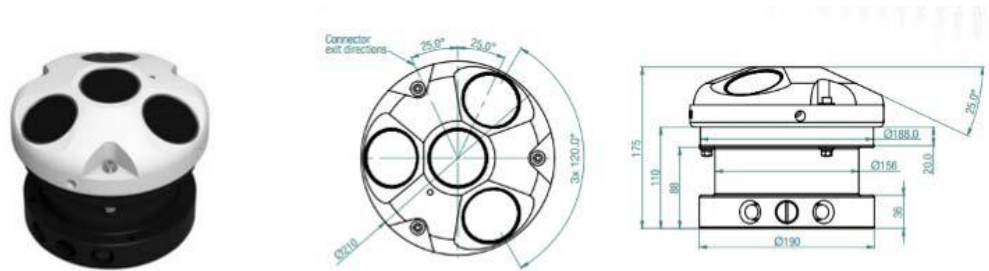


Figura 2.7. Instrumentos empleados (NORTEK-AS – AWAC 1MHz). Fuente: Informe de la Campaña.

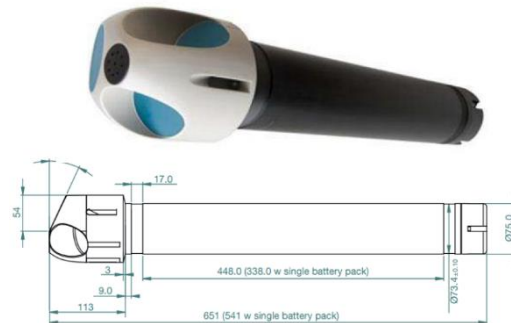


Figura 2.8. Instrumentos empleados (NORTEK-AS – AQUADOPP 600KHz). Fuente: Informe de la Campaña



### 3. METODOLOGÍA

El modelo a validar es que está operativo actualmente de la iniciativa SAMOA; la versión v1. Para validarlo, se ha decidido contrastar las predicciones hechas por éste de las variables de altura de nivel del mar y corrientes. Inicialmente se quiso incluir la temperatura, pero debido a que la temperatura proporcionada por las predicciones del modelo es sólo superficial y la proporcionada por los sensores es la correspondiente a la profundidad a la que está fondeado el sensor no se ha tenido en cuenta (ver capítulo 3.2).

La metodología que se ha establecido para validar el modelo se ha dividido en tres partes. La primera parte ha consistido en decidir qué datos de los disponibles facilitados por las campañas se iban a usar. En la segunda se ha realizado un análisis de los datos proporcionados por el modelo y se han tratado. Finalmente, la última parte ha consistido en tratar los datos proporcionados por los sensores, en decidir cómo se iban a comparar los datos, qué métricas se iban a usar y cómo se iban a descomponer las señales.

#### 3.1. CONJUNTO DE OBSERVACIONES PARA VALIDACIÓN

Para validar el modelo, se han usado las series de datos pertenecientes a campañas de obtención de datos realizadas por el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC, mencionadas en el capítulo 2.3. de este trabajo. Concretamente, se han usado los datos de la campaña de primavera 2018, que comprende el lapso de tiempo entre el 25 de abril de 2018 y el 26 de junio de 2018. El 25 de abril de 2018 se procedió a sumergir e instalar los dos equipos de medida autónomos en las localizaciones previamente fijadas y se cambiaron las baterías del PFR.

#### LOCALIZACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Esta campaña, como se ha explicado antes, contaba con tres instrumentos sumergidos. Para determinar la localización de los instrumentos fondeados se utilizaron los datos GPS y los datos de profundidad obtenidos a bordo de la embarcación de apoyo. Los puntos seleccionados para el fondeo coinciden con puntos que no presentan demasiado tránsito de barcos por encima de ellos, validados por la Autoridad Portuaria de Bilbao. En la Tabla 3.1 y en la Figura 3.1 se detallan la posición de los instrumentos fondeados en el mapa y sus coordenadas.

En acorde a la Tabla 3.1, los datos disponibles van para los equipos “no fijos” desde el 25/04 hasta el 26/06; y para el PFR, desde el 10/10/2017 hasta el 25/04/2018, ya que en el momento de la retirada final de los instrumentos “no fijos” el equipo del PFR todavía seguía sumergido.

Código	Localización	Latitud	Longitud	Profundidad	Fechas
ENT 1	Playa de la Arena	43° 21.884'N	03° 07.354'W	22.1 m	25/04/2018- 26/06/2018
INT1	Playa de Ereaga	43° 20.852'N	03° 01.563'W	12.9 m	25/04/2018- 26/06/2018
INT2 recuperado	Playa de Arriguinaga (PFR)	43° 21.885'N	03° 02.482'W	20.5 m	10/10/2017- 25/04/2018
INT2 fondeado <sup>6</sup>	Playa de Arriguinaga (PFR)	43° 21.902'N	03° 02.498'W	20.8 m	25/04/2018- 25/10/2018

Tabla 3.1. Coordenadas de las localizaciones y equipos empleados. Fuente: Informe de Campaña.



Figura 3.1. Localización de los instrumentos. Fuente: Informe de Campaña.

## DATOS PROPORCIONADOS Y UTILIZADOS

Los datos recogidos por los sensores y usados en este trabajo se pueden dividir en dos secciones, 1) datos del perfil de corrientes y 2) datos auxiliares (presión, temperatura, etc.). Estos datos vienen dados en diferentes archivos. Los archivos usados son los archivos de corrientes Este y Norte (extensiones .v1 y .v2) y los archivos de datos auxiliares (.sen).

<sup>6</sup> Se distingue entre recuperado y fondeado haciendo referencia al lapso de tiempo previo al cambio de baterías y posterior a éste.

- 1) Los datos de corriente (archivos .v1 y .v2) vienen proporcionados en forma de perfiles de corriente; es decir, el sensor toma datos de velocidad y dirección de corriente en diferentes capas o celdas de distinto grosor en dirección perpendicular al fondo marino (en el caso del PFR, en capas de 50 cm; en los otros dos sensores, en capas de 100 cm). El sensor asigna el valor obtenido de velocidad de corriente a toda la capa, y vuelve a tomar datos una vez la anchura de capa se ha sobrepasado, estableciendo así el perfil de corriente. Estos datos se toman cada 10 minutos. Por tanto, en el ejemplo del punto INT1 “no fijo” habrá datos cada 10 minutos de corriente, cada 100 cm de distancia medidos en la perpendicular al fondo marino. Todos los sensores tienen la llamada “blanking distance” que es la distancia desde la cabeza a partir de la cual se empiezan a tomar datos; en el caso del PFR esta distancia es de 40 cm y en los otros casos, esta distancia es de 50 cm.
- 2) Respecto a los datos auxiliares, sólo se han usado los datos de presión, que es la presión medida en la cabeza del sensor. Mediante la ecuación de la presión estática, se puede obtener la altura de presión, que sumada a la altura a la que se encuentra la cabeza del sensor desde el fondo, se puede obtener el nivel del mar:

$$p = \rho g z$$

donde  $p$  es la presión;

$\rho$  es la densidad del agua de mar;

$g$  es la aceleración de la gravedad;

$z$  es el nivel del mar desde la cabeza del sensor;

En el caso del PFR, la cabeza del sensor está a 80 cm del suelo marino y en los otros casos a 100cm. En la Tabla 3.2 se puede ver de una manera esquematizada las características de cada sensor.

Código	Tamaño de celda	Blanking distance	Altura Cabeza del Sensor
ENT 1	100 cm	50 cm	100 cm
INT1	100 cm	50 cm	100 cm
INT2 recuperado	50 cm	40 cm	80 cm

Tabla 3.2. Esquema de las características de los sensores instalados. Fuente: Elaboración propia, informes de campaña.

Dado que el sensor empezó a tomar datos antes de que fueran instalados y mientras estaban siendo instalados, se considera que los primeros valores y los últimos valores temporales de las series de datos coincidiendo con la instalación y la retirada de los

instrumentos no son relevantes para el estudio, por esto se ha dado un margen de tiempo para evitar este potencial problema, es decir, se han omitido los datos de velocidad de corriente y presión correspondientes a este margen de tiempo. En el subapartado 3.3.1. se detalla este margen de tiempo para cada sensor.

### 3.2. SIMULACIONES DE LOS MODELOS

Los datos del modelo para su validación están disponibles en la página web de Puertos del Estado, y son datos opendap; de acceso libre y tienen formato netCDF. Como se ha explicado en el capítulo 2.2, el modelo hace una predicción de tres días (forecasting: FC01, FC02 y FC03) basado en un día de simulación pasada (hindcasting HC01), es decir cada día realiza una predicción para ese día y otras dos para los dos días siguientes; y estas predicciones son horarias o diarias (resolución temporal horaria o diaria), por tanto, en el caso de resolución temporal horaria, cada archivo de predicción diario contará con 72 series de datos; 24 por día. En el otro caso, cada archivo de predicción diario tendrá 3 series de datos, 1 por día. Los archivos de datos de hindcasting solo cuentan con 24 series de datos, el día de simulación pasada.

De todos los datos del modelo disponibles se han tomado los datos de resolución horaria correspondientes al FC01 (24 series de datos para cada día). El principal problema de estos archivos es que no tienen valores de profundidad a pesar de que los resultados de las simulaciones del modelo sí que proporcionen datos a diferentes profundidades. Esto se debe a que los resultados que distribuye Puertos del Estado son superficiales. Esto supuso, como se ha explicado antes, que los datos predichos de temperatura por el modelo no se pudieran validar ya que los datos de temperatura disponibles en las campañas están medidos en la cabeza del sensor. Por tanto, se concluyó que la diferencia de temperatura producida por la diferencia de profundidad imposibilitaba la comparación y validación de estos datos. No obstante, los archivos de datos de predicciones con resolución temporal diaria sí tenían datos de profundidad, pero no se consideraron debido a esta baja resolución temporal. Las variables utilizadas finalmente para la validación fueron entonces la velocidad y dirección de corriente y el nivel del mar.

A todos los datos de la simulación se les encontró un problema: en un píxel de la malla los valores hidrodinámicos simulados eran demasiado extremos comparados con los demás píxeles. Para que esto no condicionara el desarrollo de la validación, se consideró un error de la simulación y se decidió omitir los valores del píxel. En la Figura 3.2 se puede el problema descrito.

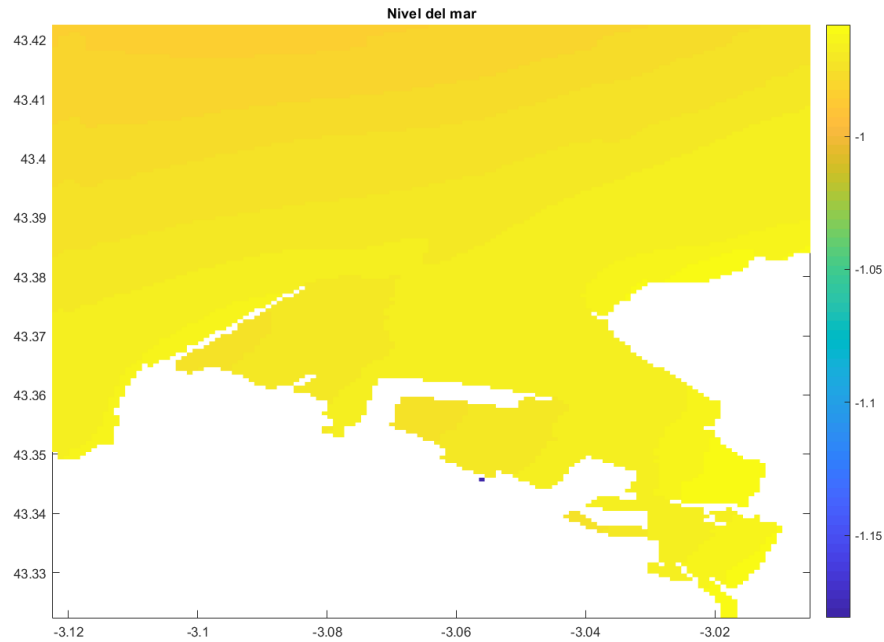


Figura 3.2. Detalle del error de simulación en la variable “nivel del mar”; en azul, el píxel con valores discordantes.  
 Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar el valor discordante del nivel del mar; mientras en los píxeles circundantes el valor simulado es de alrededor a -0.95m, el valor simulado del píxel en cuestión es de cerca de -1.2 cm. Una vez se filtraron los valores de la malla de la manera arriba descrita la simulación quedó como se puede ver en la Figura 3.3.

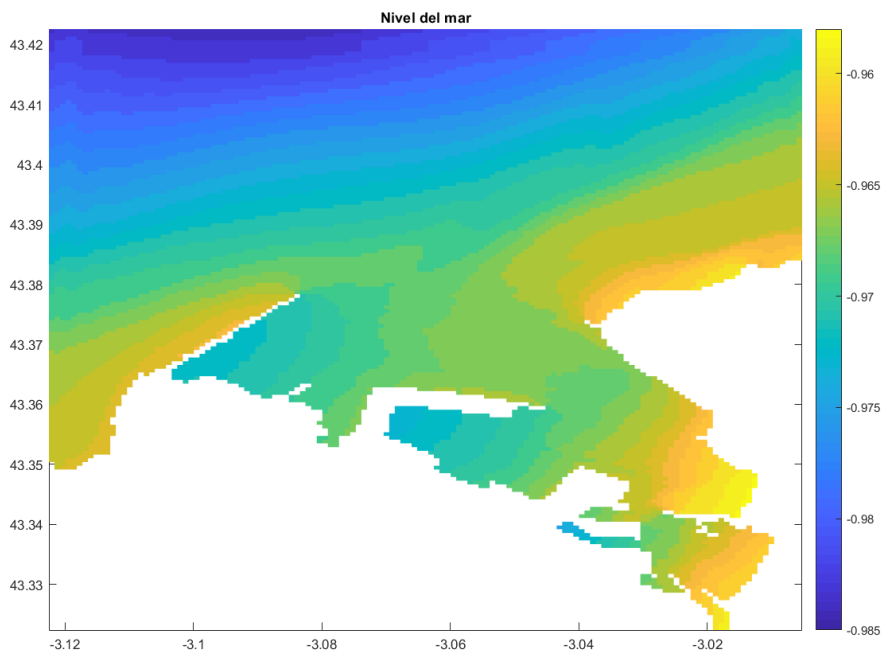


Figura 3.3. Predicción del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

Con esta modificación se procedió a validar el modelo con los datos obtenidos por las campañas. No obstante, para poder validarlo, es necesario extraer los datos del modelo correspondientes a la localización de cada sensor. Para este cometido la metodología que se siguió fue la de obtener los datos de los 9 píxeles más cercanos a las coordenadas proporcionadas por los informes de campaña de cada sensor y escoger el que más correlación y menos error daba con respecto a los datos del sensor. Se hizo así, ya que las predicciones son muy dependientes de la batimetría considerada y como puede ocurrir que la localización teórica en el modelo del sensor no sea igual a la real, para reducir la repercusión en la validación o evitar este problema.

### 3.3. ANÁLISIS DE DATOS

Los datos del modelo ya podían ser comparados con los datos del sensor; no obstante, los datos proporcionados por las campañas todavía requerían un tratamiento previo. Dado que los datos de corriente del modelo eran superficiales, se debían extraer los datos superficiales del perfil de corrientes obtenido por las mediciones del sensor:

#### 3.3.1. TRATAMIENTO DE LOS DATOS DE LAS CAMPAÑAS

Los datos de corrientes obtenidos por los sensores se graficaron como un mapa de colores en el que la barra de colores indica la velocidad de la corriente en m/s, limitada a -0.5 y 0.5 m/s para una mejor visualización (ver Figura 3.4).

Como se puede observar en la Figura 3.4, hay una gran concentración de color azul y rojo (valores extremos) en la franja cercana a los 20 m de altura correspondiente al cambio de fase desde el agua al aire. Además, al sobreponer el perfil del nivel del mar (en negro) obtenido previamente como se explica en el capítulo 3.1., se puede ver que coincide en la zona de concentración de colores.



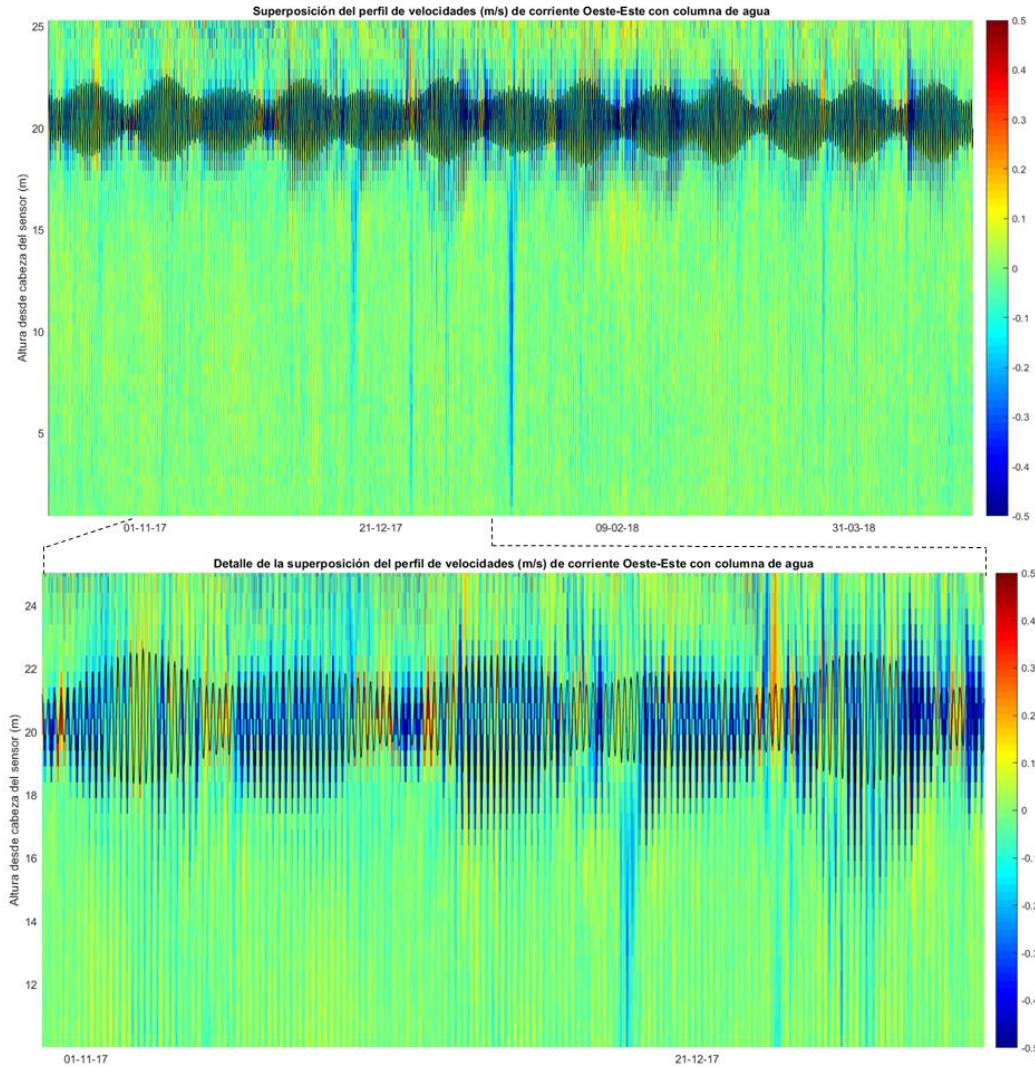
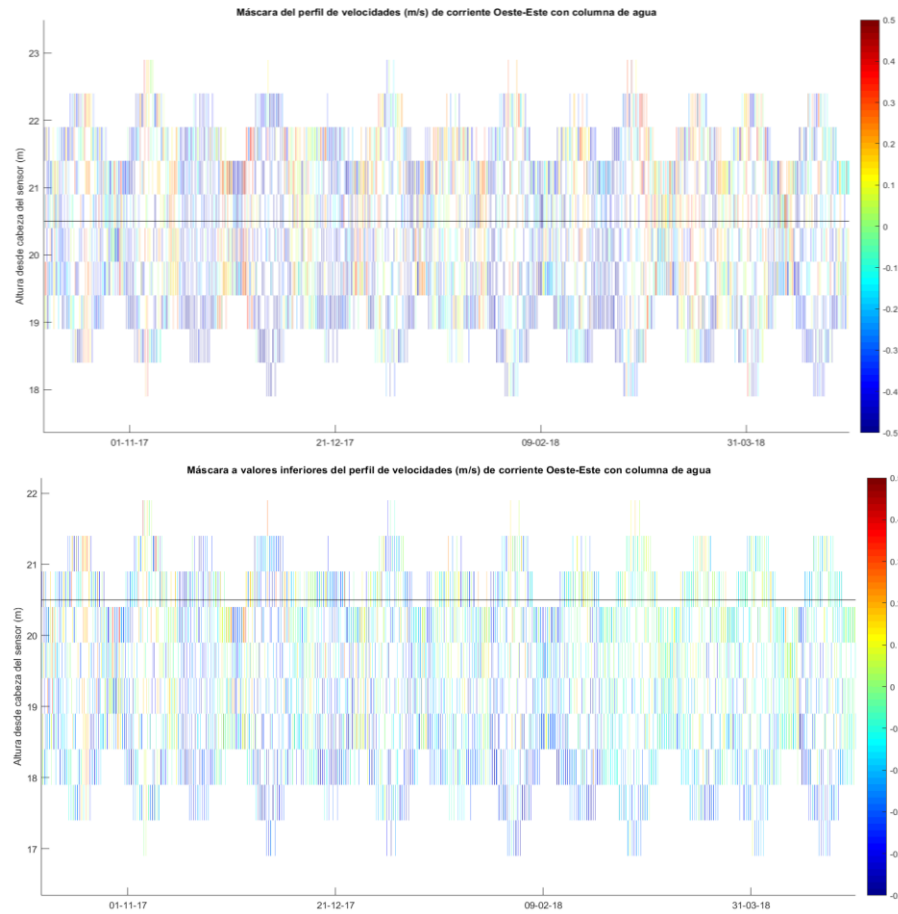


Figura 3.4. Mapa de colores del perfil de velocidades de corriente Oeste-Este correspondiente al sensor INT2 (a) y detalle (b). Fuente: Elaboración propia.

Para extraer la capa superficial de los datos obtenidos por el sensor, se aplica una máscara superior e inferior con la ayuda del perfil del nivel del mar. Se toma la anchura correspondiente a una celda y se extraen los datos que quedan comprendidos entre las dos máscaras. Se pudo observar que los datos extraídos no eran del todo correctos ya que en algunos tramos tomaban valores fuera del agua. Por tanto, se decidió tomar los valores comprendidos entre 2 anchuras de celda y 3 anchuras de celda por debajo del nivel del mar; los valores entre 1 y 2 anchuras de celda se consideró que todavía podían estar contaminados. En otras palabras, se tomó un factor de seguridad de aproximadamente dos metros. El resultado se puede ver en la Figura 3.5.b. En esta figura se puede observar que los valores de velocidad de corriente son menos extremos que en la Figura 3.5.a.



*Figura 3.5. Máscara a valores superficiales de la corriente Oeste-Este (arriba) y máscara a valores inferiores de la corriente Oeste-Este (abajo). Los datos son correspondientes al sensor INT2. En negro una línea de referencia para facilitar la comparación. Fuente: Elaboración propia.*

También se analizaron los valores entre 3 y 4 anchuras de celda, pero como se verá más adelante, la correlación del modelo era mayor para el tramo anterior.

El resultado de esta operación es un tensor con datos de dimensiones (longitud vector tiempo, nº de celdas) con sólo 1 valor finito por cada fila. De esta matriz se puede extraer un vector columna de dimensión igual a la longitud del vector tiempo. De esta manera fue posible obtener el vector de datos para la validación del modelo.

### 3.3.2. COMPARACIÓN DE LOS DATOS

Cabe recordar primero que los datos sujetos a comparación son el nivel del mar y la velocidad de corriente Oeste-Este y Sur-Norte. Para realizar la comparación de los datos, el primer paso que se dio fue el de aplicar una media móvil horaria a los datos del sensor (ya que los datos proporcionados eran de cada 10 minutos, ver capítulo 3.1), para obtener datos horarios y que fueran comparables con los datos simulados.



Las métricas estadísticas usadas para la comparación de la series de datos han sido la correlación y el error cuadrático medio:

- La correlación (R) entre dos variables aleatorias  $X$  e  $Y$  se define como:

$$R = \frac{cov[X, Y]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

donde  $cov[X, Y]$  es la covarianza de  $[X, Y]$ ,  $\sigma_X$  es la desviación estándar de la variable  $X$  y  $\sigma_Y$  es la desviación estándar de la variable  $Y$ . Se tiene que cumplir que  $\sigma_X > 0$  y  $\sigma_Y > 0$ . Mide el ajuste entre las dos variables aleatorias con valores que van del -1 al 1. En este trabajo, las variables aleatorias  $X$  e  $Y$  son los valores predichos por el modelo y las observaciones del sensor, respectivamente.

- El error cuadrático medio entre un vector de predicciones  $X$  y un vector de valores verdaderos  $Y$  se define como:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2$$

donde  $n$  es la longitud de los vector  $X$  e  $Y$ . Proporciona el promedio del cuadrado de los errores y mide la calidad de la predicción. En el caso de este trabajo, el vector  $X$  es el vector de los valores predichos por el modelo y el vector  $Y$  las observaciones del sensor.

Se obtuvo la correlación y el error cuadrático medio entre las dos series de datos. La serie de datos obtenidos por el sensor se comparó con 9 series de datos diferentes de la simulación correspondientes a los 9 píxeles más cercanos a la ubicación del sensor, para luego mantener únicamente la serie con la correlación más alta y el error más bajo.

El siguiente paso fue realizar un análisis más visual; se dibujaron las dos series de datos para su comparación y seguidamente las rosas de corrientes para cada serie.

Todo lo explicado arriba se repitió con los datos del sensor correspondientes a los incluidos entre 3 y 4 alturas de celda y se concluyó que no representaban tan bien los datos como el intervalo de celdas inmediatamente superior.

### 3.3.3. DESCOMPOSICIÓN POR ARMÓNICOS

Para poder ampliar el análisis hecho hasta ahora, se procedió a realizar una descomposición armónica de todas las series de datos; de las proporcionadas por las observaciones del sensor y de las predichas por el modelo. La descomposición se llevó a cabo mediante el software T-Tide (Pawlowicz *et al.* 2002). Este conjunto de scripts de Matlab permite analizar los armónicos de marea de la señal introducida y separar la marea astronómica de la marea meteorológica, o el residuo. El resultado de su aplicación es la descomposición de la señal

entre estas dos mareas. Proporciona también los constituyentes armónicos de la componente mareal.

Este software lleva a cabo un análisis armónico modelado como una suma de un número finito de sinusoides con frecuencias específicas (series de Fourier). Estas frecuencias se obtienen al combinar sumas y diferencias de múltiplos enteros de 6 frecuencias fundamentales que tienen que ver con movimientos planetarios. Estos parámetros representan la rotación terrestre (con un período de 24.8 horas), la órbita de la Luna alrededor de la Tierra (27 días), la órbita de la Tierra alrededor del Sol (365.24 días) y periodicidades de cambio del perigeo lunar (8.85 años), cambio en la inclinación de la órbita lunar (18.6 años) y cambio del perihelio terrestre (21 000 años). Obviando el parámetro del perihelio (se considera constante), para resolver las demás frecuencias se necesitaría series de datos superiores a 18.6 años. Dado que la mayoría suelen ser menores a 1 año, el sistema tiene que realizar asunciones sobre la fase y amplitud de los sinusoides (para más detalles referirse a Pawlowicz *et al.* 2002). Para series de datos muy de horizonte temporal muy reducido, la resolución de la frecuencia de los constituyentes se hace imposible y el sistema infiere constituyentes sabidos de datos cercanos. Por tanto, el software necesita una serie de datos temporal suficientemente larga, que aproximadamente es de 27 días. Esta longitud necesaria de la serie de datos no se alcanzaba en todos los sensores.

Al aplicar el software a los datos del modelo y de los sensores, se observó en los dos, pero sobre todo en los datos de los sensores, que no se filtraban todos los armónicos de marea y quedaban atrapados en el residuo. Por tanto, para filtrarlos, se decidió aplicar una media móvil de 6, 12 o 24 horas, según caso. Este filtrado de datos también eliminaba cierta información de variabilidad introducidas por el viento. En la Figura 3.6 se puede observar este fenómeno y su solución. A pesar de que la amplitud de la señal se reduce, el filtrado de datos mediante la media elimina las posibles señales mareales atrapadas.

Esta descomposición permitió analizar y comparar por separado las componentes mareales astronómicas y el residuo.

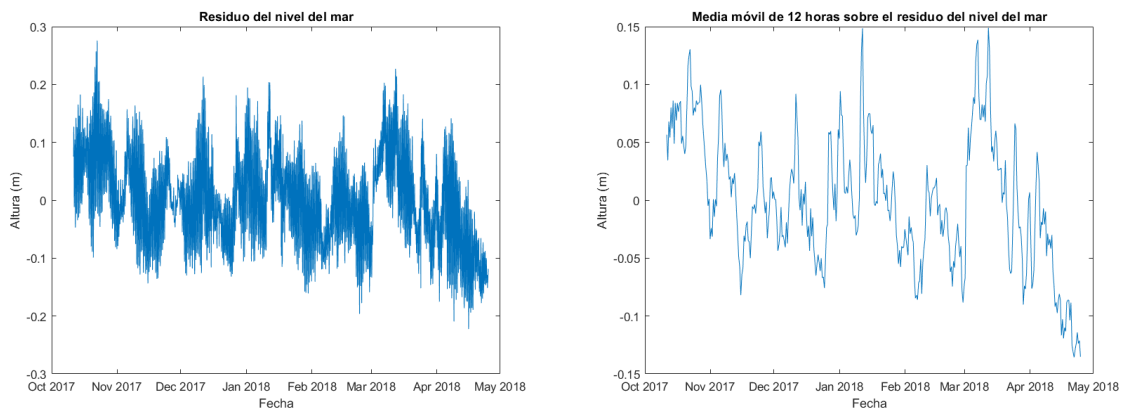


Figura 3.6. Proceso de filtrado del residuo de datos del nivel del mar correspondientes al sensor INT2 mediante una media móvil de 12 horas. Fuente: Elaboración propia.

## 4. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se detallarán los resultados obtenidos. Se dividirá en tres secciones, una por sensor.

### 4.1. INT2

Antes de presentar los resultados, en la Figura 4.1 se puede ver un esquema del fondeo del sensor INT2 correspondiente al período de fondeo antes del comienzo de la campaña de primavera 2018:

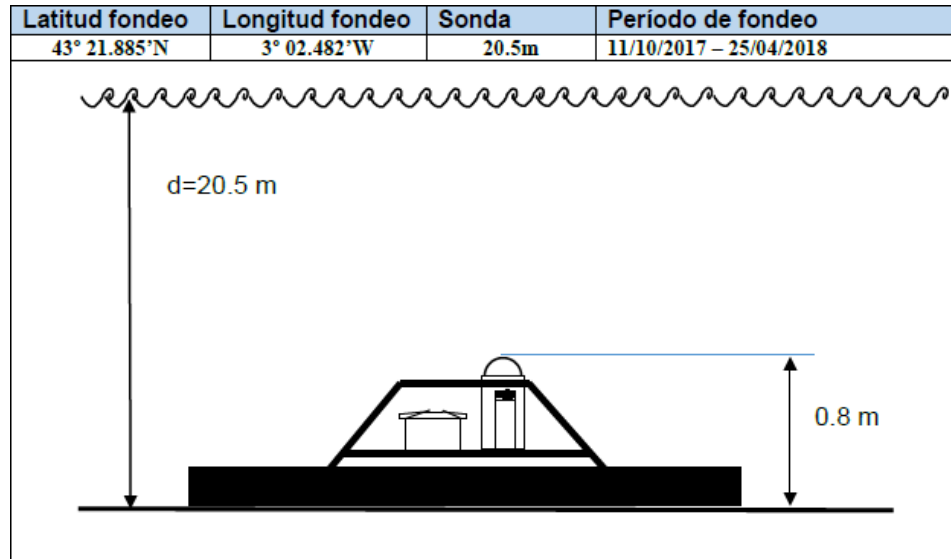


Figura 4.1. Esquema del fondeo del sensor INT2-PFR. Fuente: Informe de campaña.

La primera parte de los resultados se centrará en los inherentes a la velocidad de corriente y después se presentarán los resultados del nivel del mar. Para comparar las señales desde un punto de vista estadístico, se usarán el valor de la correlación entre las dos (R) y su error cuadrático medio (ECM).

### VELOCIDADES DE CORRIENTE

En todas las figuras que se mostrarán a continuación, el convenio de signos que se tomará será para el caso de la corriente Oeste-Este, positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste, en el caso de la corriente Sur-Norte, positivo hacia el Norte y negativo hacia el Sur.

En la Figura 4.2 se puede observar la comparativa de las mediciones de los sensores con las predicciones del modelo. A los datos de las observaciones se les ha aplicado una media horaria, para poder hacerlos comparables con los del modelo. En los dos casos la señal del sensor es más intensa que la simulada y se puede ver que en las dos figuras también el valor medio de las dos señales está desplazado uno del otro, en el caso de la componente Oeste-

Este (Figura 4.2.a), hacia valores más negativos y en el caso de la componente Sur-Norte (Figura 4.2.b) hacia valores más positivos.

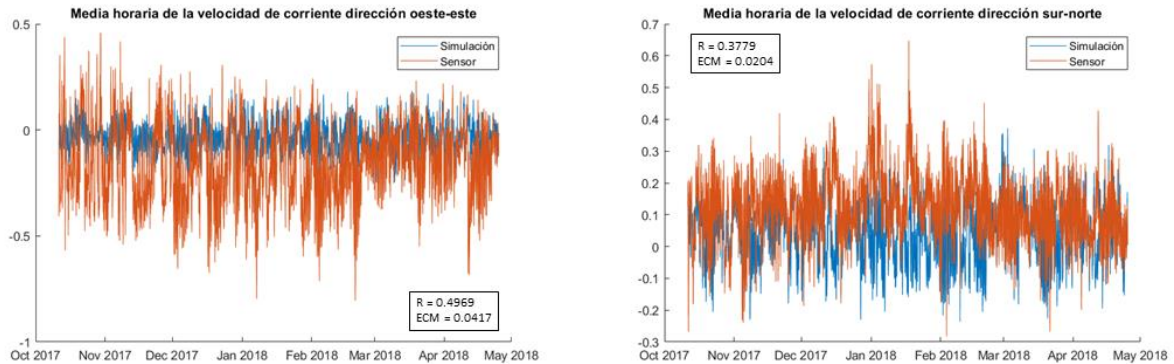


Figura 4.2. Comparación de las señales de las predicciones y de las observaciones del sensor de la media horaria (solo a las observaciones del sensor) de la velocidad de corriente (en m/s). A la izquierda la correspondiente a la coordenada Oeste-Este y a la derecha a la Sur-Norte. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.3 se muestran las mismas señales, pero filtradas con una media diaria y en la Tabla 4.1 se muestra la relación de correlaciones y errores para las señales dibujadas en las figuras

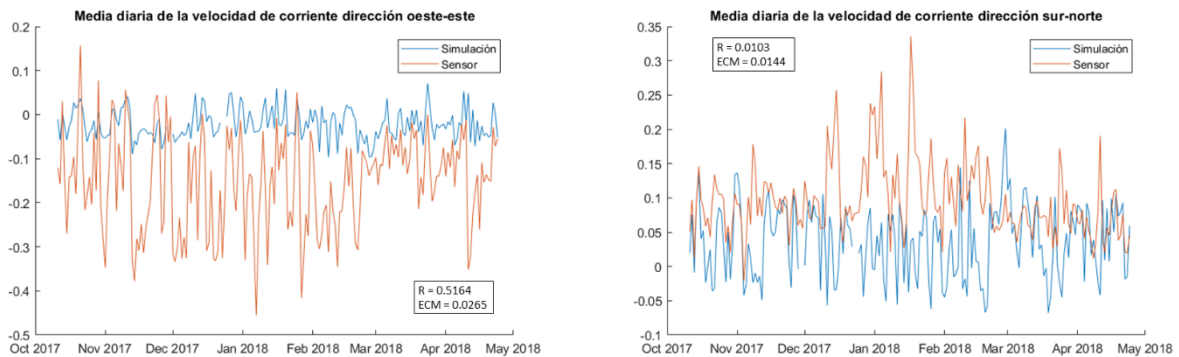


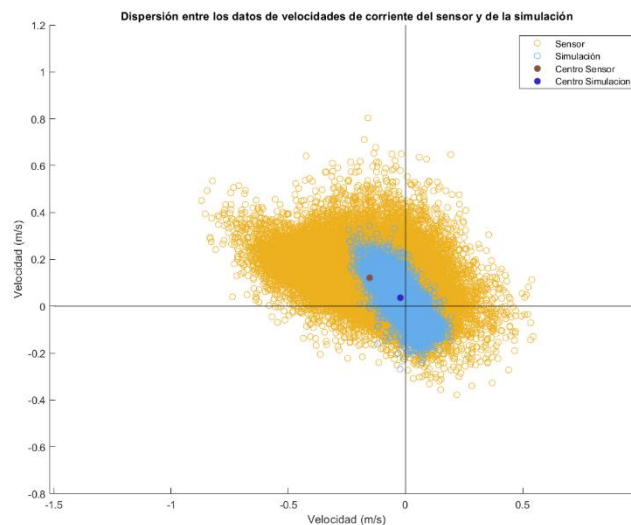
Figura 4.3. Comparación de las señales de las predicciones y de las observaciones del sensor de la media diaria de la velocidad de corriente (en m/s). A la izquierda la correspondiente a la coordenada Oeste-Este y a la derecha a la Sur-Norte. Fuente: Elaboración propia.

	Componente Oeste-Este		Componente Sur-Norte	
	Media de 1h	Media de 24h	Media de 1h	Media de 24h
<b>R</b>	<b>0.50</b>	<b>0.51</b>	<b>0.38</b>	<b>0.01</b>
<b>ECM</b>	<b>0.0417</b>	<b>0.0265</b>	<b>0.0204</b>	<b>0.0144</b>
<b>Rango de valores</b>	<b>(-0.8,0.5)</b>	<b>(-0.5,0.2)</b>	<b>(-0.3,0.7)</b>	<b>(-0.05,0.35)</b>

Tabla 4.1. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de velocidad de corriente. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras de la izquierda (4.2.a y 4.3.a) se puede observar que, aunque la señal del sensor es mucho más energética y está desplazada hacia valores negativos (hacia el Oeste), ésta se adapta en algunos tramos a la señal de las predicciones, como por ejemplo entre marzo y abril de 2018. Esto sucede también con más frecuencia en las figuras de la derecha (4.2.b y 4.3.b); la componente Sur-Norte. Respecto a las correlaciones y los errores, la componente Oeste-Este presenta una correlación decente para la media móvil horaria ( $R = 0.50$ ) que aumenta al pasar la media móvil diaria por las series de datos (hasta  $R = 0.51$ ). Respecto a la componente Sur-Norte, la correlación de la media horaria es de  $R = 0.38$ , no muy alta y al pasar la media móvil diaria baja muchísimo, hasta 0.01.

Para analizar la diferencia de amplitudes de las señales, en la Figura 4.4 se puede ver un gráfico de dispersión en el que se comparan los datos de las observaciones del sensor y los datos del modelo:



*Figura 4.4. Gráfico de dispersión de los datos de velocidad de corriente. En azul, los datos del sensor y en naranja los datos de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia.*

En esta figura se puede ver fácilmente que los valores proporcionados por el sensor tienen un valor absoluto mayor que los de las predicciones. Los datos de la simulación están comprendidos en una franja estrecha de forma rectangular e inclinada aproximadamente  $60^\circ$  respecto al eje horizontal. Este patrón sugiere que la dirección predominante de las corrientes es cercana una recta con pendiente cercana a  $-60^\circ$ . Los datos del sensor, aunque están más dispersos, también siguen esta forma rectangular con la misma inclinación. No obstante, se puede observar también que hay una gran concentración de valores en la dirección que marca una recta pasando por el origen con una inclinación de  $-30^\circ$ . Se puede observar aquí también que la serie de datos del modelo tiene un rango de valores inferior a la serie de datos de las observaciones del sensor. Para visualizar esos fenómenos de una

forma más clara, en la Figura 4.5 se dibujan las rosas de corrientes correspondientes a las observaciones del sensor y las predicciones.

Tal como se muestra en la Figura 4.5, la dirección de las corrientes en ambas rosas es predominantemente hacia el Noroeste con la pequeña diferencia que en el caso de las observaciones del sensor tienden a ir un poco más hacia el Oeste que en el caso de las simulaciones, cosa que se relaciona con la gran concentración de puntos explicada en el parágrafo anterior, con dirección  $-30^\circ$ . No obstante, el modelo predice una componente Sureste que no existe en las observaciones del sensor. Una vez más, se puede ver que el rango de valores de las predicciones del modelo es inferior al rango de las observaciones del sensor; es decir, el modelo subestima las intensidades de las velocidades de corriente.

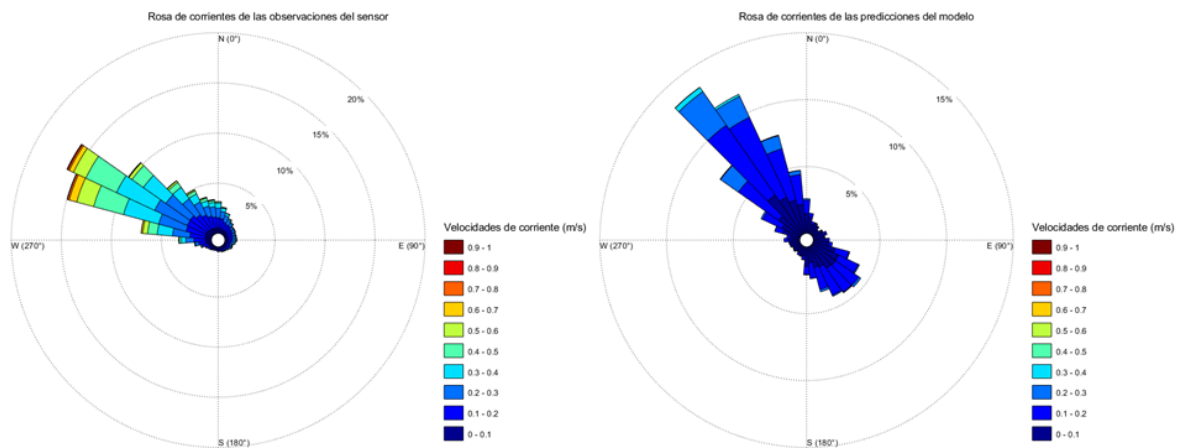


Figura 4.5. Rosa de corrientes de las observaciones (izquierda) y de los datos proporcionados por el modelo (derecha).  
 Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso, acorde a la metodología descrita, fue el de aplicar el software T-Tide a ambas señales. A continuación se presentan los resultados de la descomposición de las señales de la velocidad Oeste-Este de la corriente de los datos observados por el sensor y de los datos del modelo. La Figura 4.6 corresponde al residuo (o marea meteorológica) y la Figura 4.7 corresponde a la marea astronómica. Como se puede observar en la Figura 4.6.a, el software no es capaz de filtrar todas las componentes armónicas de la señal, y para facilitar la visualización se aplica una serie de medias móviles de 6, 12 y 24 horas. En la Tabla 4.2 se muestran las correlaciones y los errores entre las diferentes series de datos.

Componente Oeste-Este del residuo	Media de 1h	Media de 6h	Media de 12h	Media de 24h
R	0.35	0.43	0.47	0.51
ECM	0.0378	0.0319	0.0283	0.0248
Rango de valores	(-0.7,0.4)	(-0.6,0.3)	(-0.5,0.2)	(-0.4,0.1)

Tabla 4.2. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Oeste-Este del residuo. Fuente: Elaboración propia.

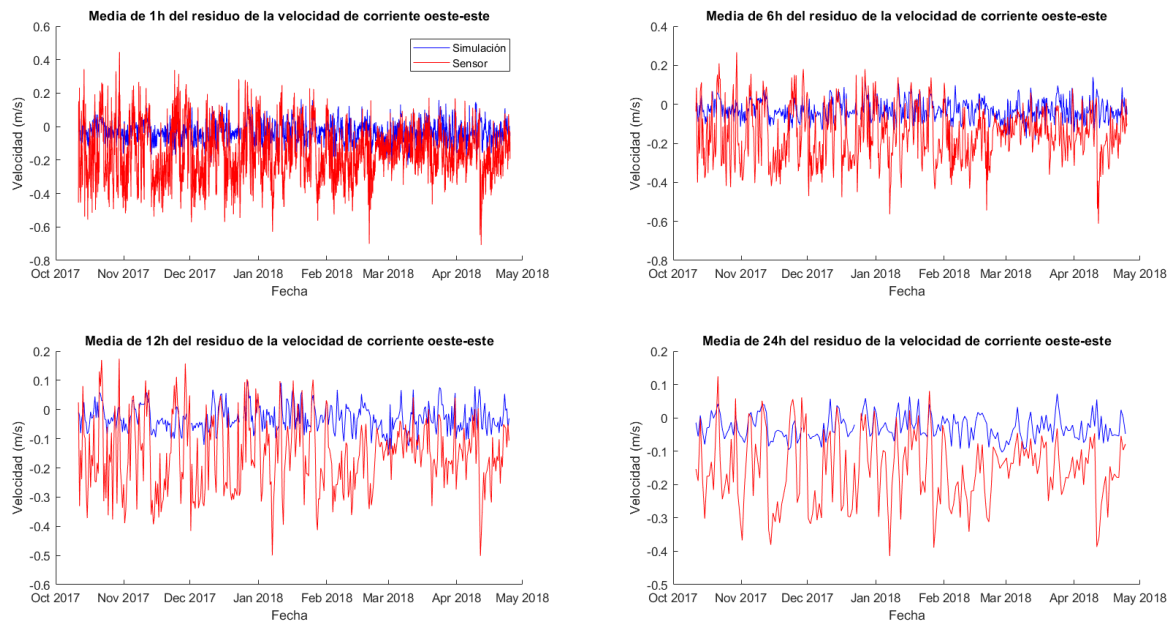


Figura 4.6. Residuo de la descomposición de la velocidad de corriente Oeste-Este. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 4.6.a. Media de 1 hora, 4.6.b. Media de 6 horas, 4.6.c. Media de 12 horas y 4.6.d. Media de 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de la media móvil de 6 horas (Figura 4.6.b) aún muestra algunos tramos de componentes armónicas no filtradas correctamente, pero a partir de las 12 horas este fenómeno ya se elimina. Como se puede observar en las cuatro figuras, se repite lo mismo que ocurría con la señal original (sin aplicarle el software T-Tide; Figura 4.2.a); la señal proporcionada por las observaciones es más energética que la obtenida por el modelo, además de proporcionar valores más negativos (desplazados hacia el Oeste). No obstante, el modelo sigue el patrón marcado por la primera con cierta exactitud.

La componente de marea astronómica se muestra en la Figura 4.7. En este caso también aparece la diferencia entre las amplitudes de las dos señales (la señal correspondiente al modelo es casi dos veces menos energética que la del sensor). Se puede apreciar que, a pesar de este hecho, el modelo consigue replicar el período de las ondas y las fluctuaciones



de amplitud de la señal muy fielmente. La correlación entre las dos señales en este caso es de  $R = 0.82$ ; muy alta si se compara con las correlaciones de las Tablas 4.1 (solo Oeste-Este) y 4.2 y el  $ECM = 0.0032$ , muy bajo para el rango de valores de la serie. Solo se muestran los resultados correspondientes a la media horaria ya que los resultados de las otras medias no se han considerado relevantes.

	R	ECM	Rango de valores
<b>Componente Oeste-Este astronómica</b>	<b>0.82</b>	<b>0.0032</b>	<b>(-0.3,0.2)</b>

Tabla 4.3. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Oeste-Este astronómica. Fuente: Elaboración propia.

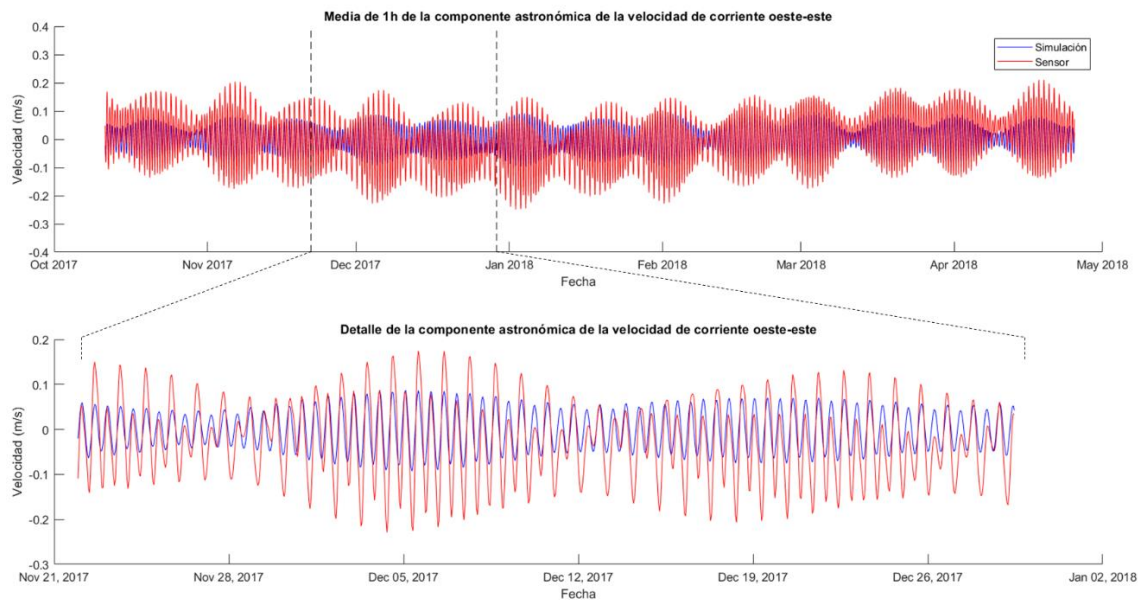


Figura 4.7. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de la señal predicha por el modelo con la señal de las observaciones del sensor de la componente Oeste-Este de la velocidad de corriente debida a la marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la descomposición de la señal para la componente Sur-Norte se muestran en la Figura 4.8.

Tal como se ha estado viendo hasta ahora, las señales de la componente Sur-Norte también muestran una diferencia energética entre ellas, además de que las predicciones están desviadas hacia el Sur respecto a las observaciones del sensor. Este fenómeno también está presente en la señal original, como se puede ver en la Figura 4.2.b. El análisis estadístico proporciona unas correlaciones no muy buenas (ninguna sobrepasa 0.14; ver Tabla 4.4).



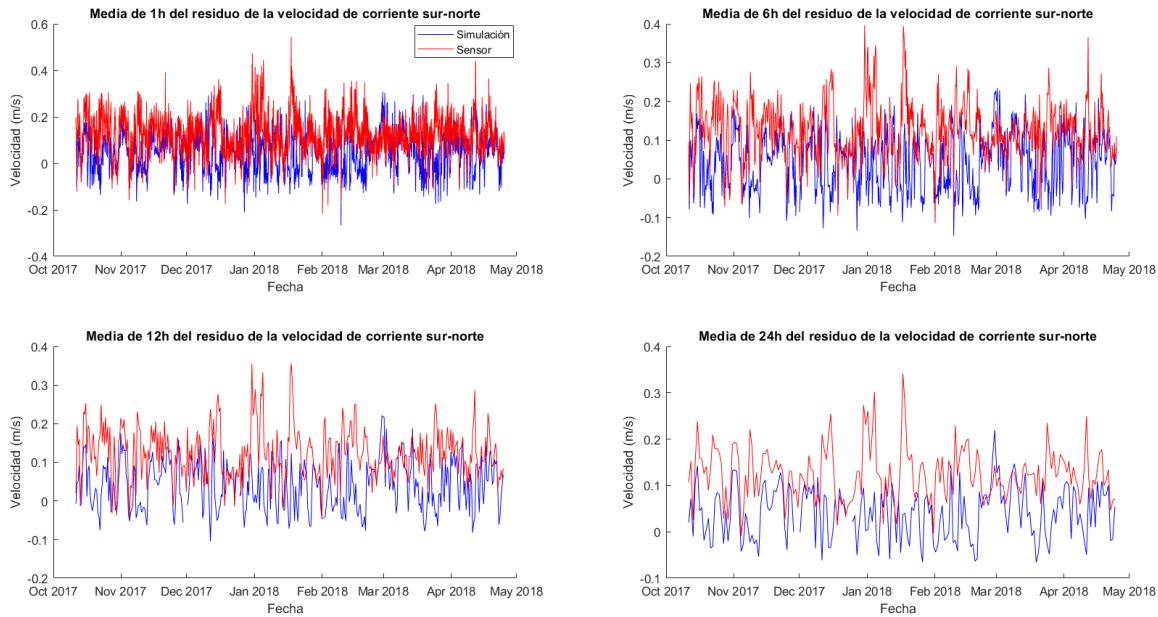


Figura 4.8. Residuo de la descomposición de la velocidad de corriente Sur-Norte. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 4.8.a. Media de 1 hora, 4.8.b. Media de 6 horas, 4.8.c. Media de 12 horas y 4.8.d. Media de 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

Componente Sur-Norte del residuo	Media de 1h	Media de 6h	Media de 12h	Media de 24h
R	0.13	0.14	0.12	0.08
ECM	0.0191	0.0163	0.0146	0.0131
Rango de valores	(-0.2,0.5)	(-0.15,0.4)	(-0.1,0.35)	(-0.05,0.35)

Tabla 4.4. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Sur-Norte del residuo. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la componente armónica, los resultados se muestran en la Figura 4.9. Se puede observar que, en este caso, la diferencia de amplitudes de las señales es mínima y la predicción se ajusta muy bien a los valores del sensor. No obstante, no es capaz de reproducir la gran fluctuación que presenta la señal de las observaciones del sensor. La correlación entre las señales es muy alta ( $R = 0.87$ ).

	R	ECM	Rango de valores
Componente Sur-Norte astronómica	0.87	0.0191	(-0.15,0.2)

Tabla 4.5. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Sur-Norte astronómica. Fuente: Elaboración propia.

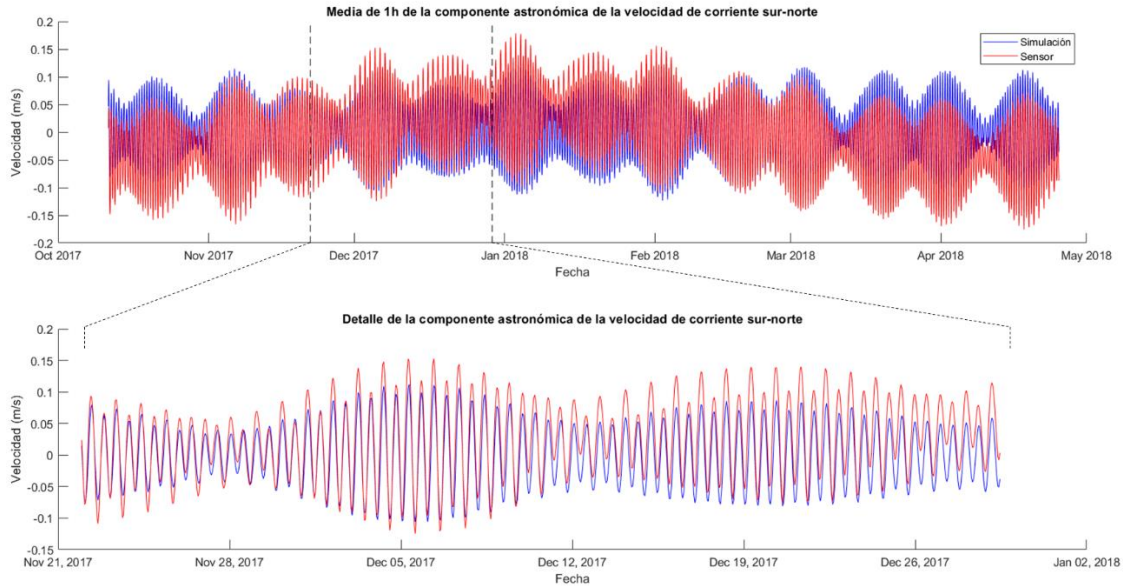


Figura 4.9. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de la señal predicha por el modelo con la señal de las observaciones del sensor de la componente Sur-Norte de la velocidad de corriente debida a la marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar la presentación de los resultados, en las Figuras 4.10 y 4.11 se exponen la comparación de las rosas de corrientes para la componente de la marea meteorológica (Figura 4.10) y para la astronómica (Figura 4.11).

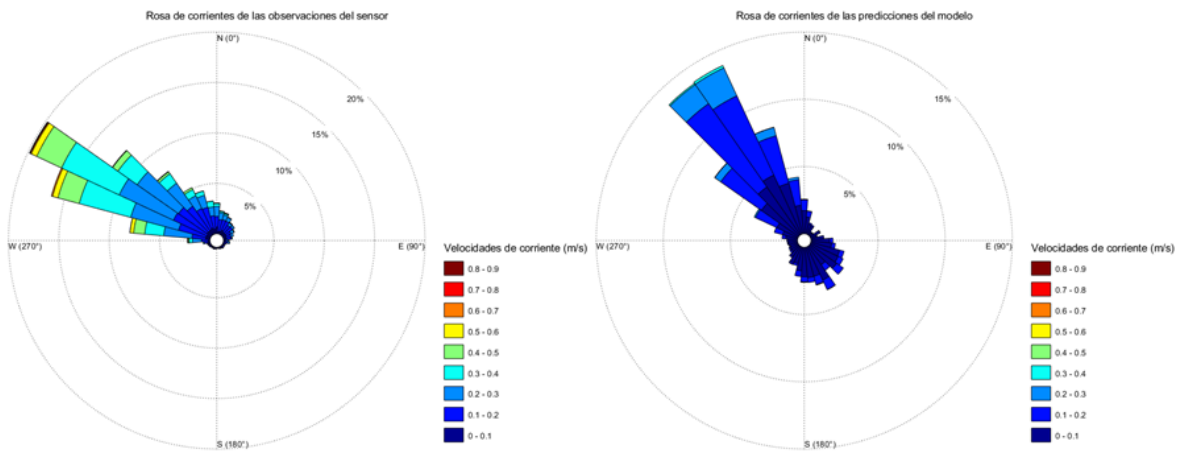


Figura 4.10. Comparación de las rosas de corrientes de las observaciones del sensor (izquierda) y de las predicciones (derecha) correspondientes a la componente de marea meteorológica. Fuente: Elaboración propia.

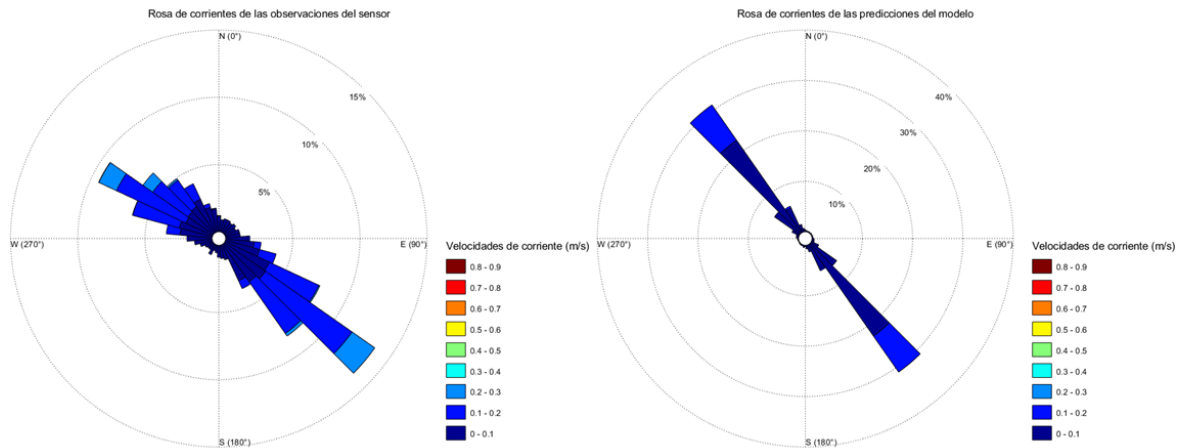


Figura 4.11. Comparación de las rosas de corrientes de las observaciones del sensor (izquierda) y de las predicciones (derecha) correspondientes a la componente de marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.10 se puede observar que las predicciones de la velocidad de corriente muestran una dirección principal que tiende más hacia el Norte que los medidos por los sensores, además de, igual que se ha podido observar en las anteriores figuras de velocidades de corriente, tener un rango de valores menor (la velocidad máxima predicha es de 0.4 m/s mientras que la medida es de 0.9 m/s). El modelo también predice una componente hacia el Sureste que no aparece en los datos proporcionados por el sensor.

En la Figura 4.11, correspondiente a las corrientes generadas por la marea astronómica, el fenómeno del rango de valores también aparece, aunque de una forma mucho menos marcada. No obstante, el modelo sí que consigue una predicción muy buena en las direcciones principales de la corriente.

## NIVEL DEL MAR

Los datos del nivel del mar proporcionados por el sensor están medidos como una columna de agua en la que la cota 0 es la altura de la cabeza del sensor. Dado que el modelo hace predicciones del nivel del mar partiendo del 0 y dando valores positivos y negativos, se tienen que adaptar los datos del sensor. Para esto, se ha tomado la altura del fondo marino proporcionada por los informes de campaña en la ubicación del sensor INT2 (ver Figura 4.1), se le ha restado la altura correspondiente de la cabeza del sensor y el valor resultado de esta operación se ha usado para centrar los datos del sensor en el 0, restándolo a todos los datos del sensor.

En la Figura 4.12 se muestra la comparativa entre las predicciones del modelo y las observaciones del sensor del nivel del mar, en la que se puede observar que los datos

simulados son casi iguales que los proporcionados por el sensor, con una pequeña diferencia en la altura. No obstante, la predicción se ajusta perfectamente a los ciclos mareales y a los ciclos lunares, en período y altitud; la correlación es muy alta y el error cuadrático medio es bajo respecto al rango de valores de la serie (ver Tabla 4.6).

	R	ECM	Rango de valores
<b>Nivel del mar</b>	<b>0.97</b>	<b>0.1370</b>	<b>(-2.5,2)</b>

Tabla 4.6. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para las dos series del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

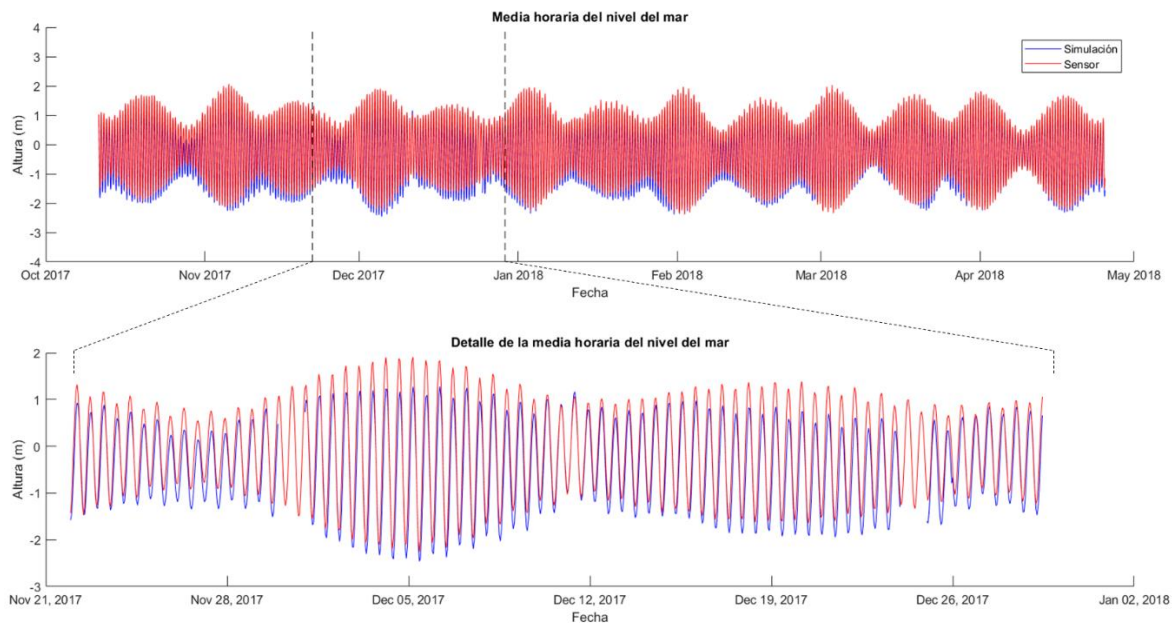


Figura 4.12. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de la señal predicha por el modelo con la señal de las observaciones del sensor del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se ha hecho para las corrientes, se procede a descomponer la señal en marea astronómica y residuo o marea meteorológica con el software T-Tide para Matlab. En la Figura 4.13 se muestra el residuo (marea meteorológica) del nivel del mar, y, dado que el software no es capaz de filtrar todos los armónicos de marea, se le añade una serie de medias móviles de 6, 12 y 24 horas para tratar de eliminarlo. La media móvil de 12 horas elimina en gran medida y la de 24 horas completamente.

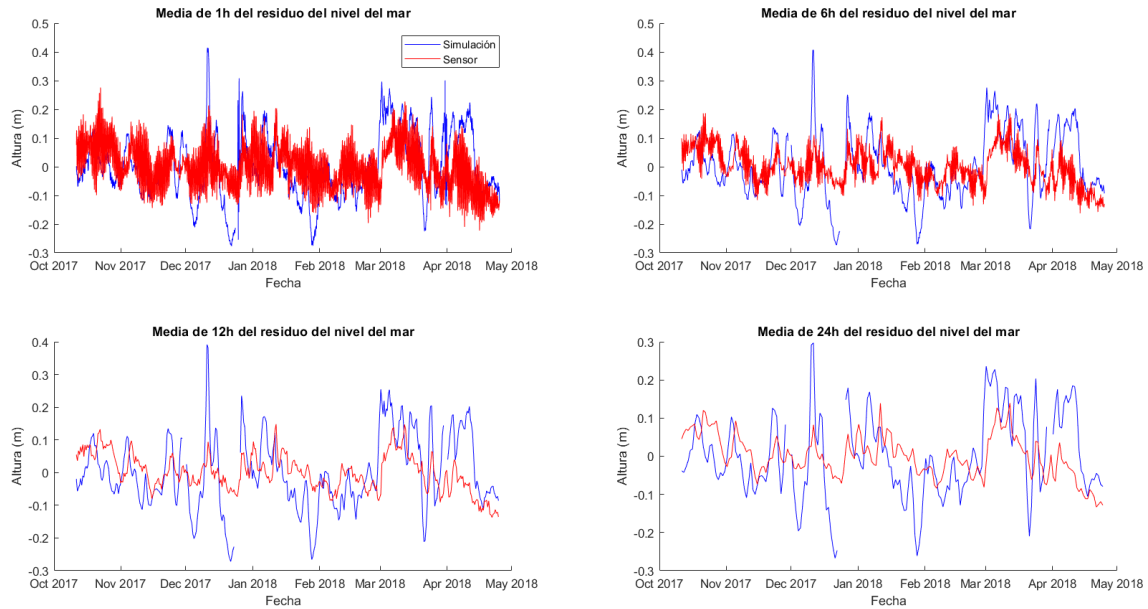


Figura 4.13. Residuo de la descomposición del nivel del mar. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 4.13.a. Media de 1 hora, 4.13.b. Media de 6 horas, 4.13.c. Media de 12 horas y 4.13.d. Media de 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la Figura 4.13, en general la predicción del residuo del nivel del mar se ajusta bastante bien a las observaciones del sensor; los perfiles de ambas señales coinciden a grandes rasgos y en algunos tramos la predicción es muy buena, como por ejemplo en el intervalo de octubre-diciembre de 2017. No obstante, la amplitud de las predicciones excede mucho la amplitud de la señal del sensor. En la Tabla 4.7 se muestran las correlaciones y el error para cada caso:

Residuo del nivel del mar	Media de 1h	Media de 6h	Media de 12h	Media de 24h
R	0.280	0.324	0.386	0.393
ECM	0.0143	0.0125	0.0110	0.0105
Rango de valores	(-0.3,0.45)	(-0.3,0.4)	(-0.3,0.4)	(-0.3,0.3)

Tabla 4.7. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales del nivel del mar del residuo. Fuente: Elaboración propia.

A medida que se filtra más la señal, la correlación aumenta y el error disminuye. Las correlaciones están en un intervalo de 0.28 a 0.40 y los errores entre 0.010 y 0.015.

En la Figura 4.14 se muestra la parte de marea astronómica descompuesta por el software T-Tide:

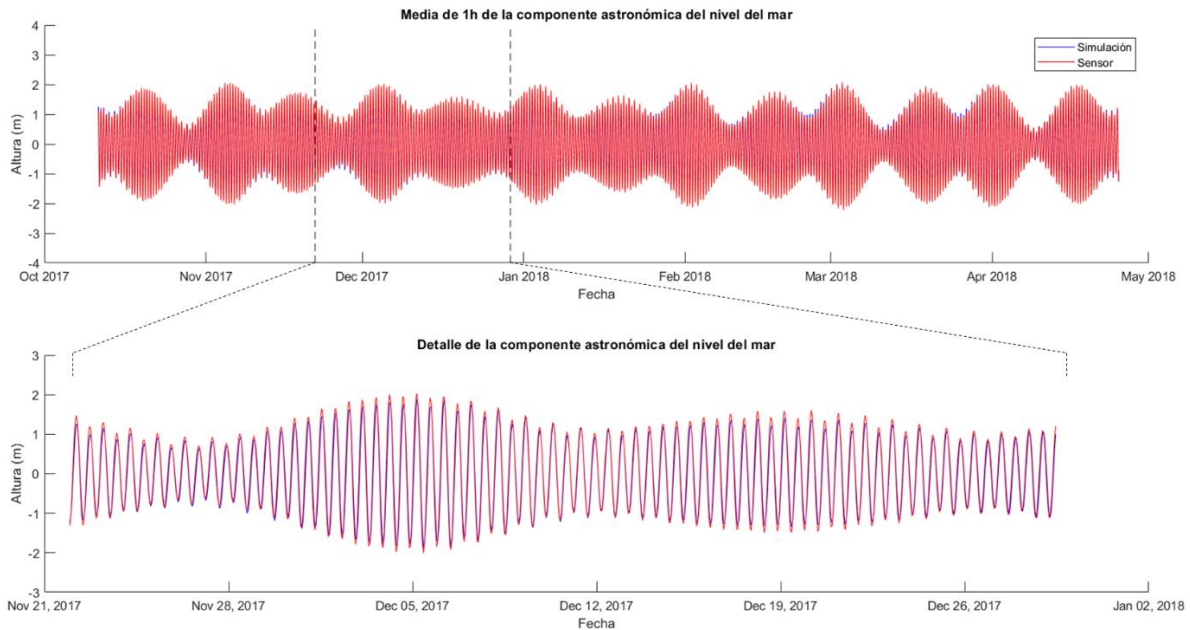


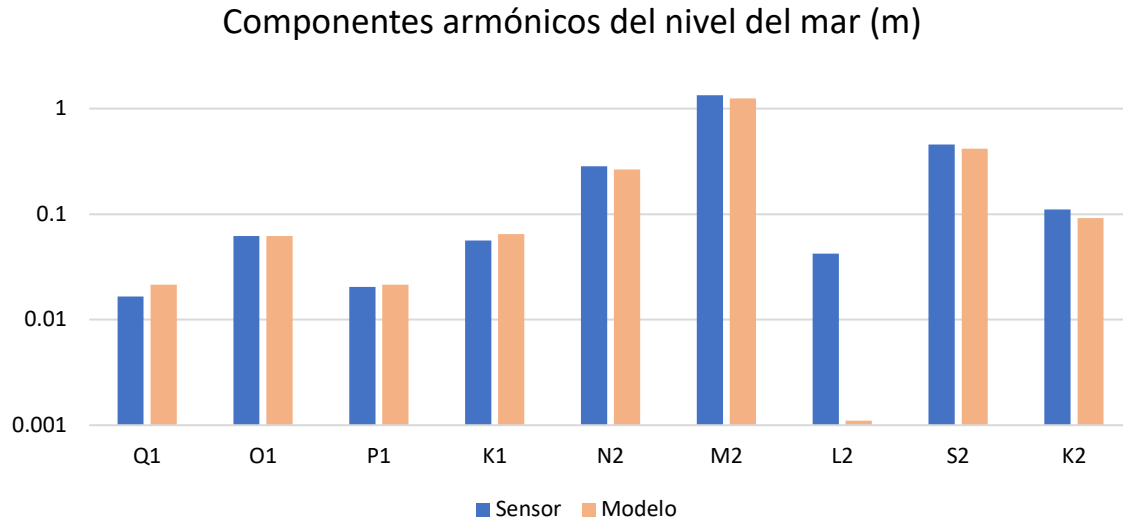
Figura 4.14. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de la señal predicha por el modelo con la señal de las observaciones del sensor del nivel del mar correspondiente a la marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la predicción genera una señal que es completamente idéntica a la señal medida por el sensor en todos los aspectos. La correlación entre las dos es muy alta ( $R = 0.98$ ) y el error muy bajo comparado con el rango de los valores ( $ECM = 0.0478$ ).

Componente astronómica	R	ECM	Rango de valores
Nivel del mar	0.98	0.0478	(-2,2)

Tabla 4.8. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para las dos series de la componente astronómica del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

Para poder ver de forma más clara si existen o no diferencias en la marea astronómica se ha realizado un análisis de los principales armónicos de marea (Figura 4.15). En general las diferencias de amplitud en los componentes armónicos son mínimas, con excepción de la componente L2, que la predicción del modelo es mucho más pequeña que la componente medida por el sensor.



*Figura 4.15. Componentes armónicos del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.*

## 4.2. ENT1

En este caso, cuando se procedió a extraer los datos correspondientes al píxel más cercano a las coordenadas de la localización del sensor ENT1, se advirtió que éste se localizaba en un extremo del mapa de colores, de manera que el píxel más cercano a la localización de las coordenadas de sensor era un píxel del contorno del mapa de colores (el extremo izquierdo del mapa de la Figura 3.3). Respecto al sensor ENT1, en la Figura 4.16 se presenta un esquema del fondeo.

En el informe de campaña, se indicaba que el sensor ENT1 sufrió una modificación brusca en la estructura del fondeo: “La losa de hormigón sufrió una modificación brusca del roll y profundidad con un movimiento repentino destacado el 11/05/2018 coincidiendo con el temporal mayor medido durante esta campaña (con Hs hasta 4.11m)” (Cateura & Sospedra, 2018, pág. 15). Por esto, primero se decidió observar la diferencia de las lecturas del sensor antes y después del 11/05/2018, cosa que se puede ver más adelante, en la Figura 4.17.



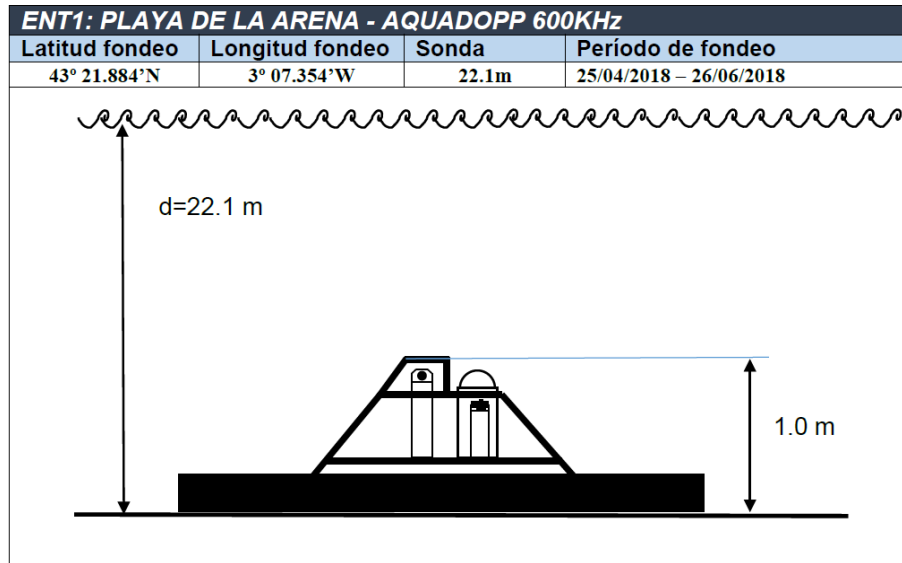


Figura 4.16. Esquema del fondeo del sensor ENT1. Fuente: Informe de campaña.

## VELOCIDADES DE CORRIENTE

Siguiendo el orden marcado para el sensor INT2, en la Figura 4.17 se muestran las comparaciones de las predicciones del modelo y las observaciones hechas por el sensor para las componentes Oeste-Este (4.17.a) y Sur-Norte (4.17.b) de la velocidad de corriente. A los datos proporcionados por el sensor, para hacerlos comparables con las predicciones, se les ha aplicado una media móvil de una hora.

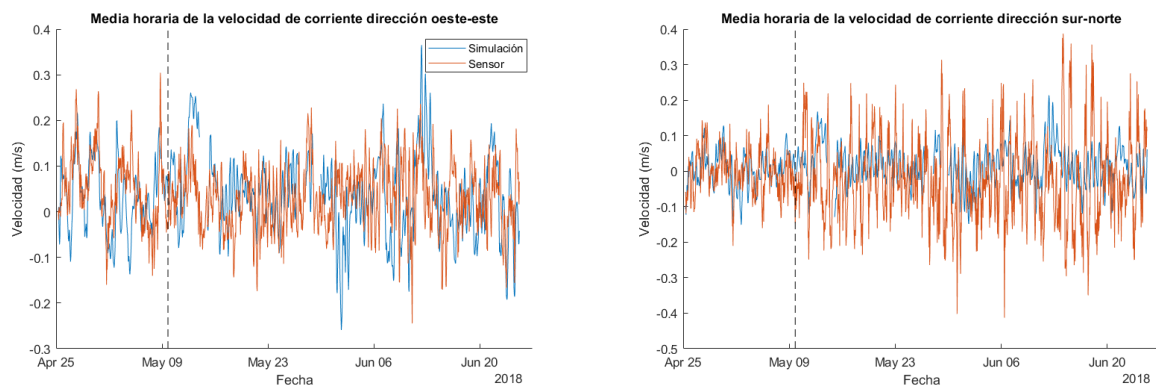
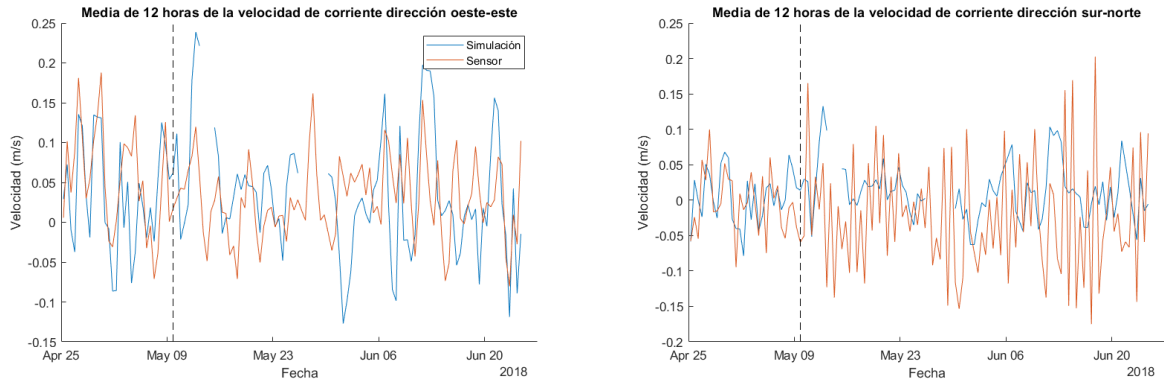


Figura 4.17. Comparación de las señales de las predicciones y de las observaciones del sensor de la media horaria (solo a las observaciones del sensor) de la velocidad de corriente (m/s). A la izquierda la correspondiente a la coordenada Oeste-Este (a) y a la derecha a la Sur-Norte (b). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.18 se presentan los mismos datos, pero se les ha aplicado a todas las series una media móvil de 12 horas para filtrar la señal.

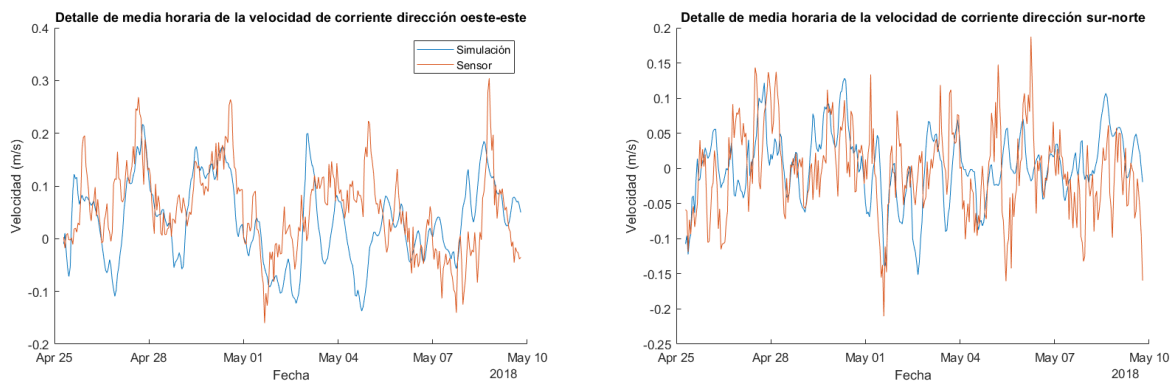




*Figura 4.18. Comparación de las señales de las predicciones y de las observaciones del sensor de la media diaria de la velocidad de corriente. A la izquierda la correspondiente a la coordenada Oeste-Este (a) y a la derecha a la Sur-Norte (b). La línea a rayas corresponde al 09/05/2018 a las 19:00. Fuente: Elaboración propia.*

Como se puede observar en las Figuras 4.17 y 4.18, a partir del 11/05/2018, las medidas del sensor empiezan a ser muy diferentes de las predicciones del modelo y además en la componente Sur-Norte, muy erráticas. Por esto, se ha decidido usar los datos disponibles de las observaciones del sensor sólo hasta el 09/05/2018, para así evitar también el comienzo del temporal. Por tanto, a partir de este momento la serie de datos considerada irá desde el 25/04/2018 al 09/05/2018, de manera que el rango de datos queda muy reducido. En la Figura 4.19 se muestra la comparativa de las dos componentes de la velocidad de corriente y en la Tabla 4.10 las correlaciones y los errores.

La reducción de las series de datos, que pasa a ser de 14 días, hace que la aplicación del software T-Tide no sea posible. Como se ha explicado en el capítulo 3.3.3, el software necesita una serie de datos suficientemente grande para poder descomponer correctamente los constituyentes armónicos de la señal. Por tanto, se ha decidido no hacer la comparación de las componentes mareales y residuales de ambas señales.



*Figura 4.19. Detalle de la comparación de las señales de las predicciones y de las observaciones del sensor de la media diaria de la velocidad de corriente. A la izquierda la correspondiente a la coordenada Oeste-Este (a) y a la derecha a la Sur-Norte (b). La línea a rayas corresponde al 09/05/2018 a las 19:00. Fuente: Elaboración propia.*

Detalle de la media de 1h	Componente Oeste-Este	Componente Sur-Norte
<b>R</b>	<b>0.44</b>	<b>0.28</b>
<b>ECM</b>	<b>0.0074</b>	<b>0.0047</b>
<b>Rango de valores</b>	<b>(-0.2,0.3)</b>	<b>(-0.25,0.2)</b>

Tabla 4.9. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios correspondientes al detalle de las señales de velocidad de corriente. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.19 se puede ver que ambas componentes de la señal de la predicción se adaptan muy bien a la señal de los datos obtenidos por el sensor, sobre todo la componente Oeste-Este, cosa que se corresponde en una correlación mejor que la otra componente (Tabla 4.10). En ambas los valores máximos de velocidad de corriente medidas por el sensor son ligeramente mayores que las predichas por el modelo.

En la Figura 4.20 se presenta un gráfico de dispersión de las velocidades de corriente. Como se puede observar, ambas series de datos se ajustan bastante bien, y están comprendidas en una franja con dirección Noroeste-Suroeste. Para visualizar mejor las direcciones de corriente, en la Figura 4.21 se muestran las rosas de corrientes.

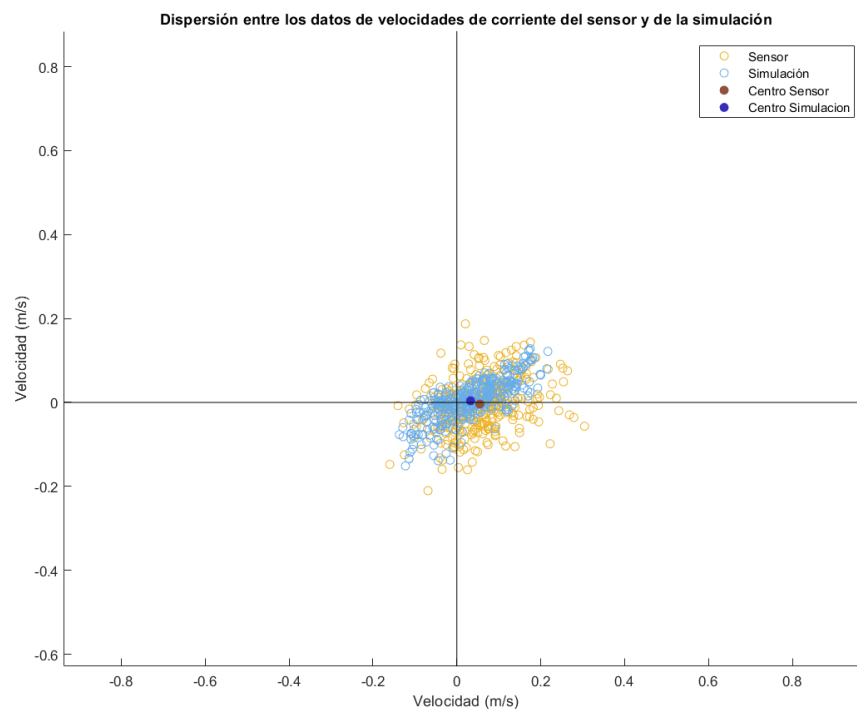


Figura 4.20. Gráfico de dispersión de los datos de velocidad de corriente. En azul, los datos del sensor y en naranja los datos de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.21 se puede ver que el modelo predice unas direcciones de corriente muy parecidas a las medidas por el sensor a pesar de que éste último muestre medidas ligeramente más direccionadas hacia el Este que las predichas por el modelo; que son más hacia el Norte. Además, las corrientes predichas son un poco menos intensas que las medidas, cosa que se ha observado también en la Figura 4.19.

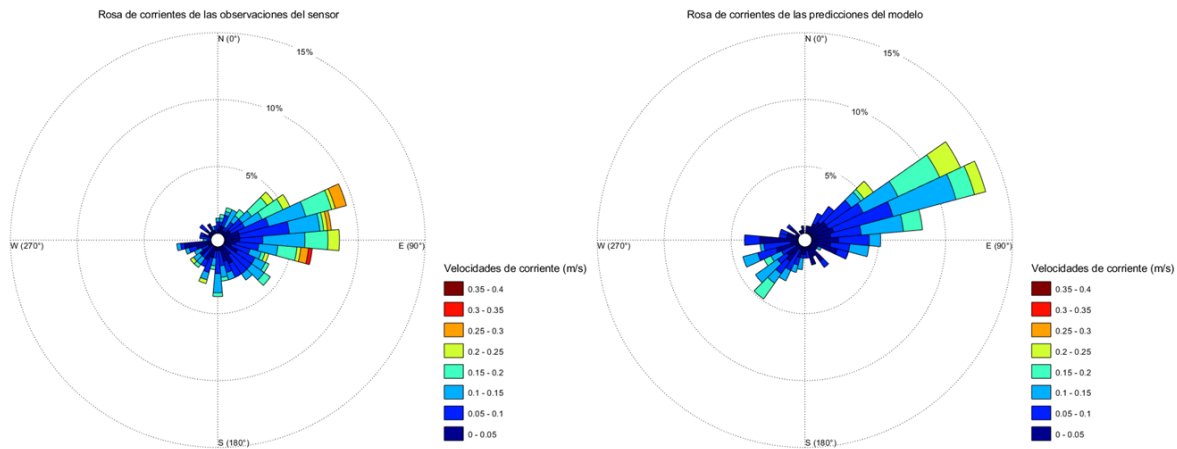


Figura 4.21. Rosa de corrientes de las observaciones (izquierda) y de los datos proporcionados por el modelo (derecha).  
 Fuente: Elaboración propia.

## NIVEL DEL MAR

Se ha asumido lo mismo que se indica para el caso del sensor INT2, explicado previamente en relación con el nivel del mar. En la Figura 4.22 se presenta el primer resultado; se trata de una comparación entre el nivel del mar observado por el sensor y la altura predicha por el modelo. Como se ha hecho en la Figura 4.18, se ha marcado en la Figura 4.22.a con una línea a rayas el momento hasta el cual se va a considerar la serie de datos para la validación y en la Figura 4.22.b el detalle hasta la línea a rayas. En la Tabla 4.10 se muestran la correlación y el error para la serie de datos reducida. Al observar la Figura 4.22.b se puede observar que las dos señales se superponen casi perfectamente, proporcionando una correlación de  $R = 0.97$  y un error cuadrático medio de  $ECM = 0.0638$ .

	R	ECM	Rango de valores
<b>Nivel del mar</b>	<b>0.97</b>	<b>0.0638</b>	<b>(-2.5,1.5)</b>

Tabla 4.10. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para las dos series de datos reducidas del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

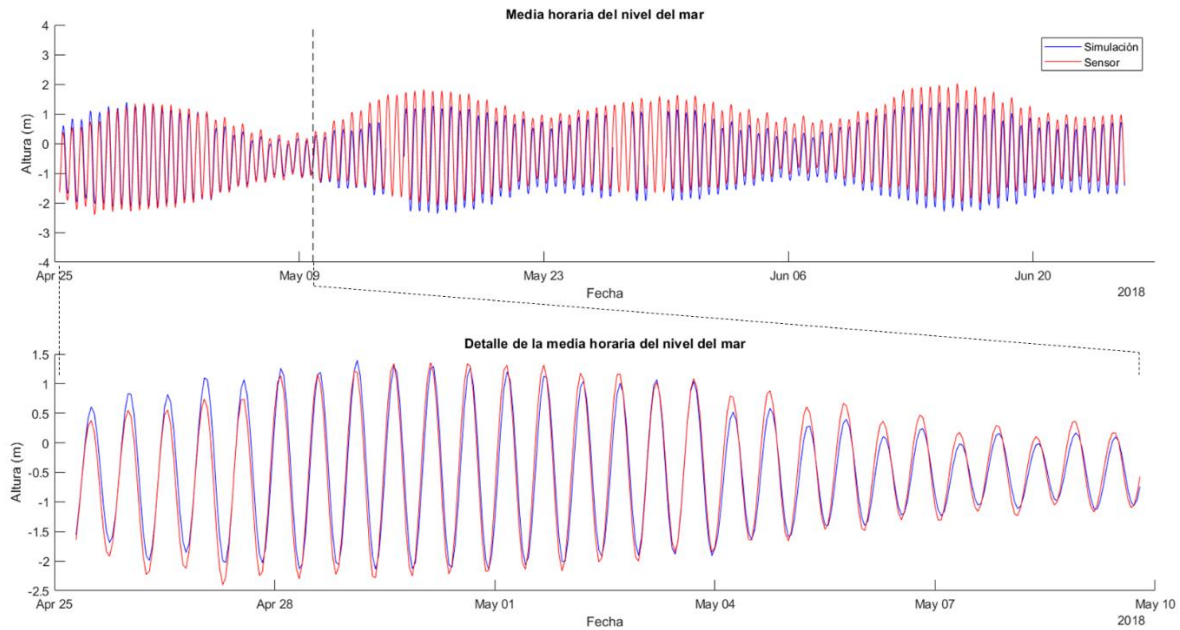


Figura 4. 22. Comparación (arriba (a)) y detalle (abajo (b)) de la señal predicha por el modelo con la señal de las observaciones del sensor del nivel del mar. La línea a rayas corresponde al 09/05/2018 a las 19:00. Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. INT1

En la Figura 4.23 se presenta un esquema del fondeo del sensor INT1:

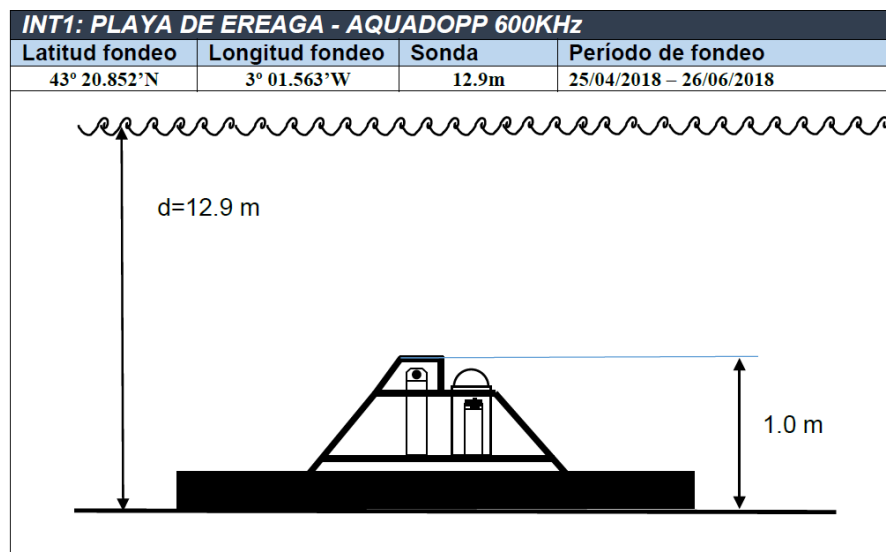
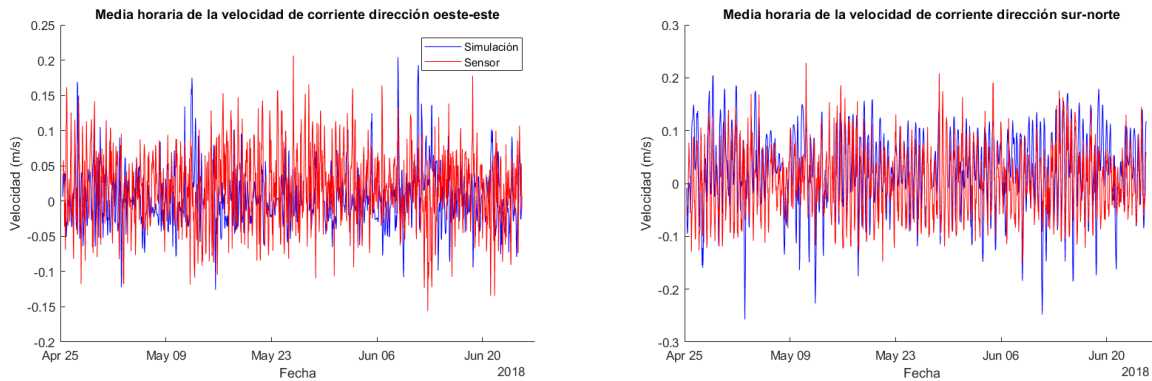


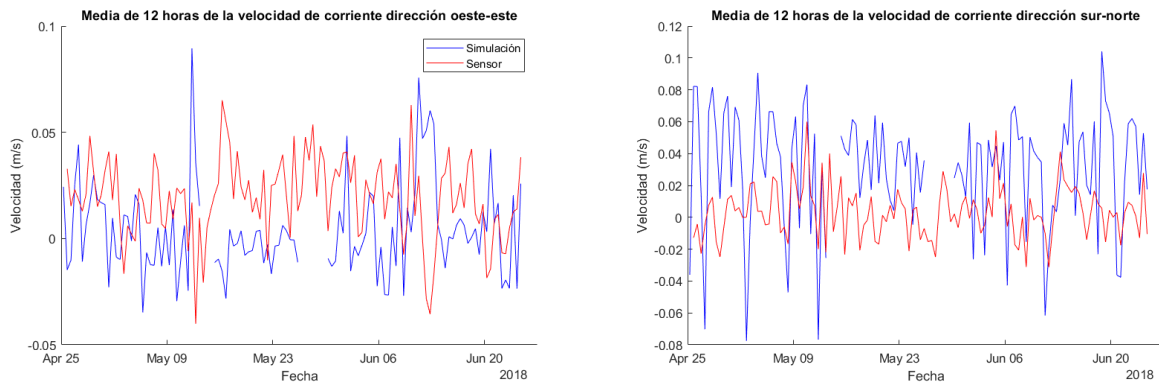
Figura 4.23. Esquema del fondeo del sensor INT1. Fuente: Informe de campaña.

## VELOCIDADES DE CORRIENTE

Como se ha hecho hasta ahora, primero se presentarán los resultados correspondientes a la velocidad de corriente. La primera figura refleja una comparación de la predicción del modelo y las observaciones hechas por el sensor para la velocidad de corriente (Figura 4.24). A los datos de estas últimas se les ha aplicado una media móvil de una hora para hacerlas comparables. En la Figura 4.25 se presenta los mismos datos, pero filtrados con una media móvil de 12 horas para facilitar su visualización.



*Figura 4.24. Comparación de las señales de las predicciones y de las observaciones del sensor de la media horaria (solo a las observaciones del sensor) de la velocidad de corriente. A la izquierda la correspondiente a la coordenada Oeste-Este (a) y a la derecha a la Sur-Norte (b). Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 4.25. Comparación de las señales de las predicciones y de las observaciones del sensor de la media de 12 horas de la velocidad de corriente. A la izquierda la correspondiente a la coordenada Oeste-Este (a) y a la derecha a la Sur-Norte (b). Fuente: Elaboración propia.*

Se puede observar que, en general, la predicción no se ajusta bien a los datos de las observaciones del sensor. La predicción de la componente Oeste-Este en algunos tramos supera en amplitud a lo observado por el sensor y en otros tramos se mantiene en línea. La predicción de la componente Sur-Norte excede por mucho la amplitud de la señal de las observaciones. La correlación de la media diaria de la componente Oeste-Este presenta es de  $R = -0.01$  (muy mala) y un error cuadrático medio de  $ECM = 0.0044$ ; la media de 12 horas muestra en cambio una mejora importante de aumento de correlación (llega hasta  $R = -0.24$ ) pero sigue siendo baja. Para la otra componente, la correlación de la media horaria es

bastante alta comparada con las otras variables ( $R = 0.55$ ) pero al pasar la media de 12 horas la correlación baja y visualmente las señales se ajustan mucho menos (la amplitud de la señal de las predicciones pasa a ser mucho mayor que la amplitud de la señal de las observaciones; ver Tabla 4.11).

	Componente Oeste-Este		Componente Sur-Norte	
	Media de 1h	Media de 12h	Media de 1h	Media de 12h
<b>R</b>	<b>-0.01</b>	<b>-0.24</b>	<b>0.55</b>	<b>0.31</b>
<b>ECM</b>	<b>0.0044</b>	<b>0.0012</b>	<b>0.0048</b>	<b>0.0020</b>
<b>Rango de valores</b>	<b>(-0.15,0.20)</b>	<b>(-0.05,0.1)</b>	<b>(-0.25,0.25)</b>	<b>(-0.08,0.1)</b>

Tabla 4.11. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de velocidad de corriente. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra un gráfico de dispersión de las velocidades de corriente (Figura 4.26):

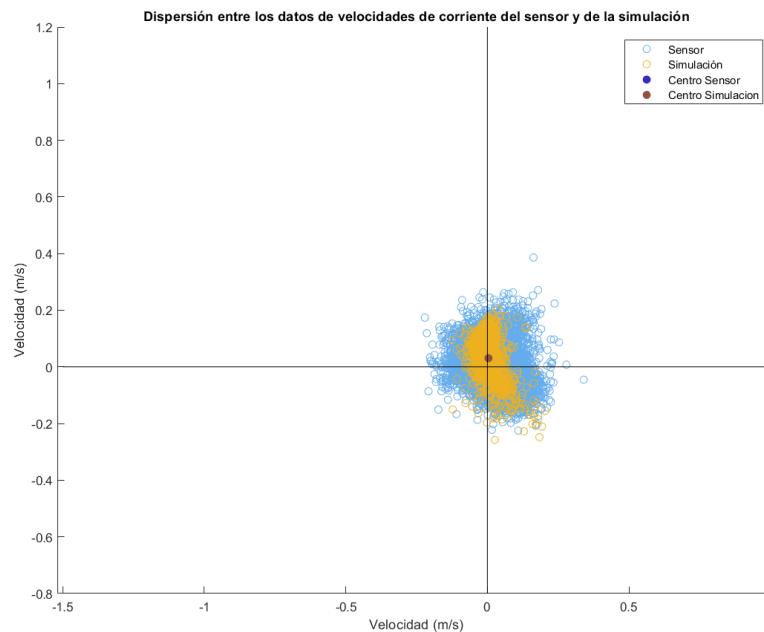


Figura 4.26. Gráfico de dispersión de los datos de velocidad de corriente. En azul, los datos del sensor y en naranja los datos de las simulaciones. Fuente: Elaboración propia.

En ese caso, el diagrama de dispersión de ambas series de datos se ajusta bastante, con la diferencia que las observaciones del sensor se dispersan un poco más que las predicciones del modelo. Cabe destacar que las medias de las dos series de datos coinciden en el mismo punto. En la Figura 4.27 se presentan las rosas de corrientes para las dos series:



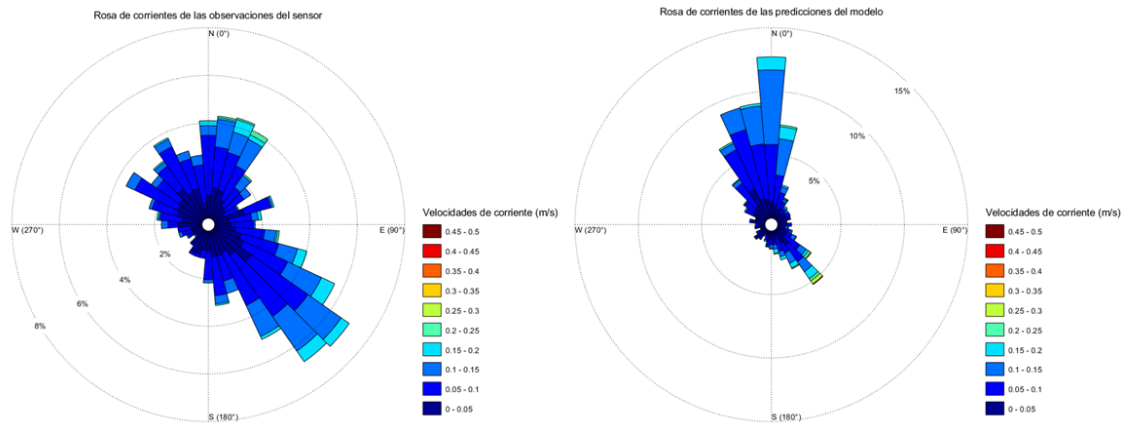


Figura 4.27. Rosa de corrientes de las observaciones (izquierda) y de los datos proporcionados por el modelo (derecha).  
 Fuente: Elaboración propia.

Las observaciones hechas por el sensor presentan un abanico de corrientes casi en dos direcciones marcadas: Nordeste y Sureste, mientras que el modelo predice una dirección principal hacia el Norte y otra hacia el Sureste. Comparando los dos casos, se puede afirmar que, aunque el modelo no muestre el abanico completo de corrientes, sí que predice bien las direcciones principales.

Siguiendo los pasos dados en los otros dos sensores, ahora se procederá a presentar los resultados de la descomposición de la señal en marea astronómica y meteorológica. En la Figura 4.28 se presenta la componente Oeste-Este de la velocidad de corriente generada por la marea meteorológica. Como ha pasado en los otros dos casos, el software no ha sido capaz de filtrar todos los armónicos, por tanto, se muestran también diferentes medias móviles aplicadas a la señal:

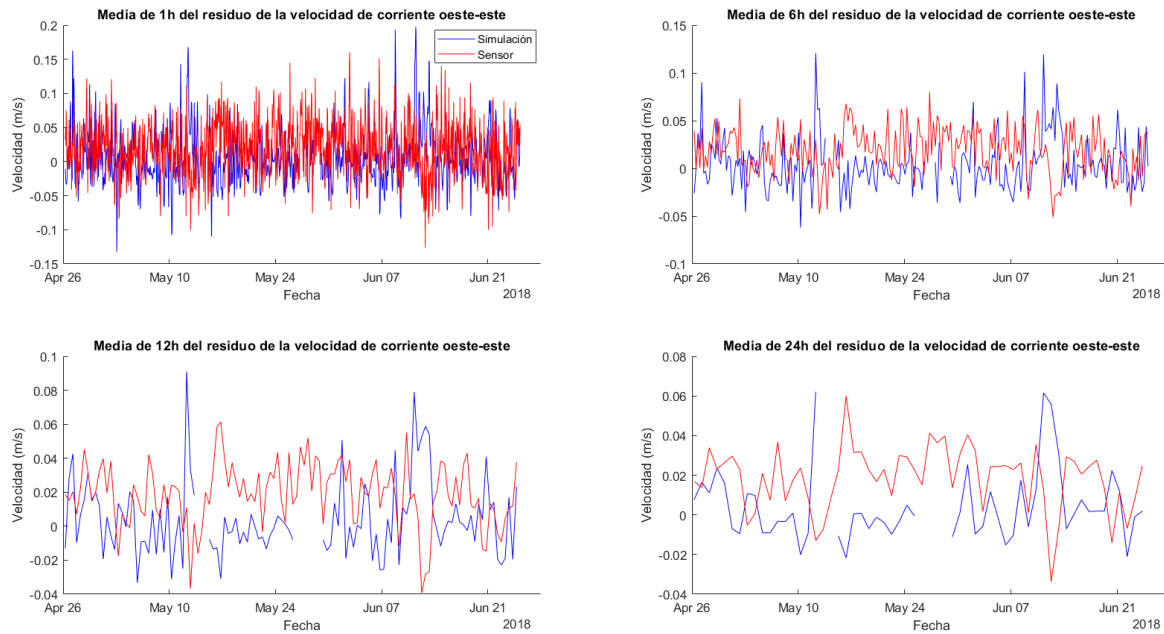


Figura 4.28. Residuo de la descomposición de la velocidad de corriente Oeste-Este. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 4.28.a. Media de 1 hora, 4.28.b. Media de 6 horas, 4.28.c. Media de 12 horas y 4.28.d. Media de 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.28 se puede ver que la señal de la predicción se ajusta bastante bien visualmente a la señal de las observaciones del sensor; sobre todo al principio y al final de la serie de datos. No obstante, si se tienen en cuenta los valores de la correlación mostrados en la Tabla 4.12, ésta es muy baja para el primer caso de media horaria de una hora ( $R = -0.03$ ) pero crece notablemente a medida que se va aumentando el tamaño temporal de la media, llegando a un máximo de  $R = -0.43$  para la media de 24 horas (a pesar de que visualmente las señales no se ajusten demasiado bien).

Componente Oeste-Este del residuo	Media de 1h	Media de 6h	Media de 12h	Media de 24h
<b>R</b>	<b>-0.03</b>	<b>-0.11</b>	<b>-0.26</b>	<b>-0.43</b>
<b>ECM</b>	<b>0.0032</b>	<b>0.0017</b>	<b>0.0012</b>	<b>0.0010</b>
<b>Rango de valores</b>	<b>(-0.15,0.2)</b>	<b>(-0.06,0.12)</b>	<b>(-0.04,0.09)</b>	<b>(-0.04,0.06)</b>

Tabla 4.12. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Oeste-Este del residuo. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la componente armónica, en la Figura 4.29 se muestra el resultado de la descomposición:

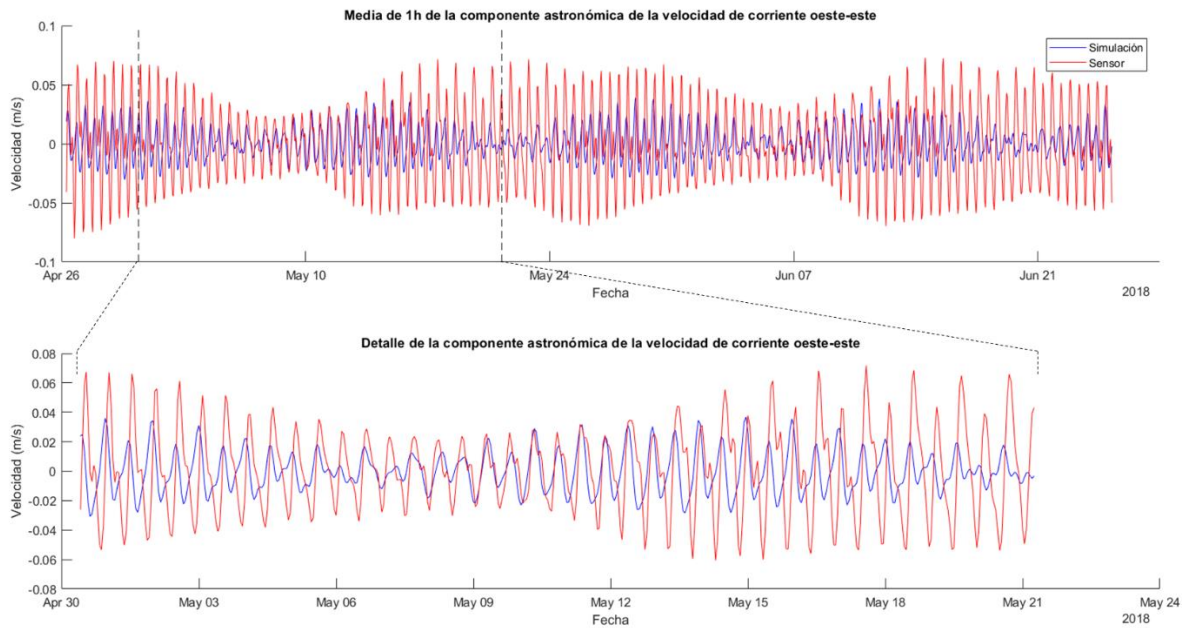


Figura 4.29. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de las señales de las predicciones del modelo con las observaciones del sensor de la componente Oeste-Este de la velocidad de corriente de la marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

	R	ECM	Rango de valores
<b>Componente Oeste-Este astronómica</b>	<b>0.12</b>	<b>0.0011</b>	<b>(-0.06,0.07)</b>

Tabla 4.13. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Oeste-Este astronómica. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.29 se puede observar que el modelo no consigue reproducir bien toda la componente generada por la marea astronómica; falla sobre todo en predecir una amplitud demasiado baja (casi la mitad de la medida por el sensor) y también falla en los períodos de onda (tampoco se ajustan a las observaciones del sensor), cosas que se traducen en una correlación muy baja ( $R = 0.12$ ; Tabla 4.13).

Respecto a los resultados de la componente Sur-Norte, éstos se muestran en la Figura 4.30.

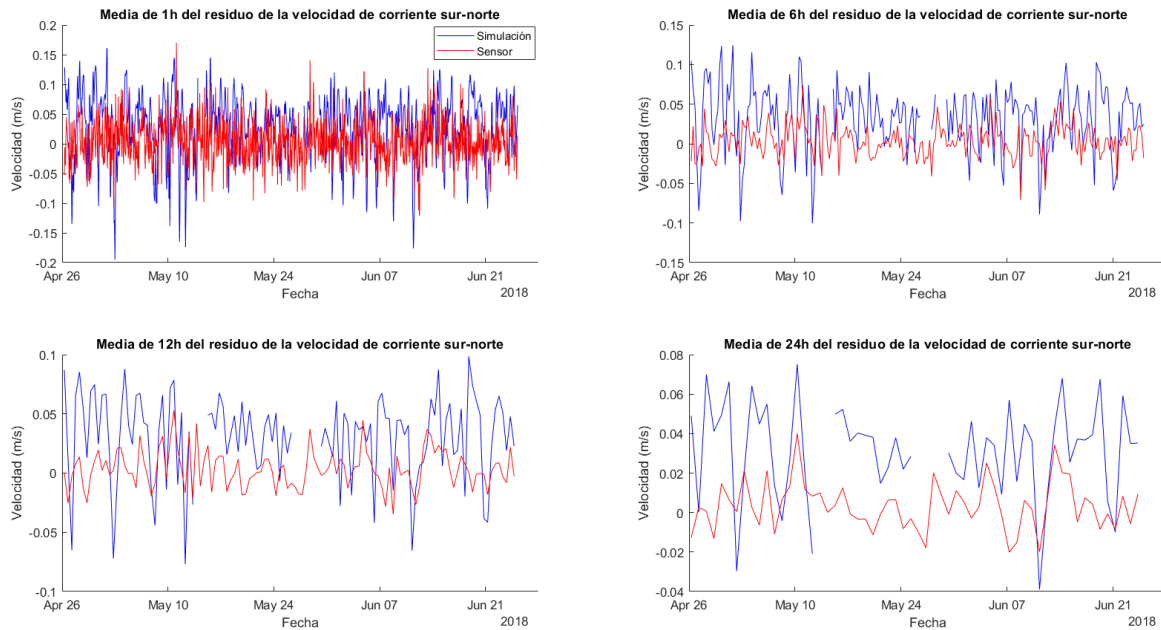


Figura 4.30. Residuo de la descomposición de la velocidad de corriente Sur-Norte. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 4.30.a. Media de 1 hora, 4.30.b. Media de 6 horas, 4.30.c. Media de 12 horas y 4.30.d. Media de 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

Componente Sur-Norte del residuo	Media de 1h	Media de 6h	Media de 12h	Media de 24h
<b>R</b>	<b>0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>0.31</b>	<b>0.26</b>
<b>ECM</b>	<b>0.0044</b>	<b>0.0025</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.0014</b>
<b>Rango de valores</b>	<b>(-0.2,0.17)</b>	<b>(-0.1,0.13)</b>	<b>(-0.08,0.09)</b>	<b>(-0.04,0.08)</b>

Tabla 4.14. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Sur-Norte del residuo. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, la señal del modelo supervalora la amplitud de la señal de las observaciones del sensor y se comporta de forma errática con picos muy pronunciados hacia valores negativos, que no existen en el caso de las observaciones del sensor y además la señal del modelo está trasladada hacia el Norte respecto a la señal del sensor. Respecto a las correlaciones, la serie de datos que mejor correlación presenta es correspondiente a la media móvil de 12 horas, con una correlación de  $R = 0.31$  y un error de  $ECM = 0.0020$ . Se puede ver esto también de forma visual en la Figura 4.30.c, (ver Tabla 4.14).

Respecto a la componente astronómica, en la Figura 4.31 se puede ver que el modelo hace una predicción casi exacta de la componente generada por la marea astronómica. Falla en algunos tramos, en unos subestima las observaciones en los tramos coincidentes con luna

medio llena y las sobrevalora en los tramos de luna nueva o llena. La correlación de la serie de datos es muy buena, de  $R = 0.91$  y el error es de  $ECM = 0.0004$  (Tabla 4.15).

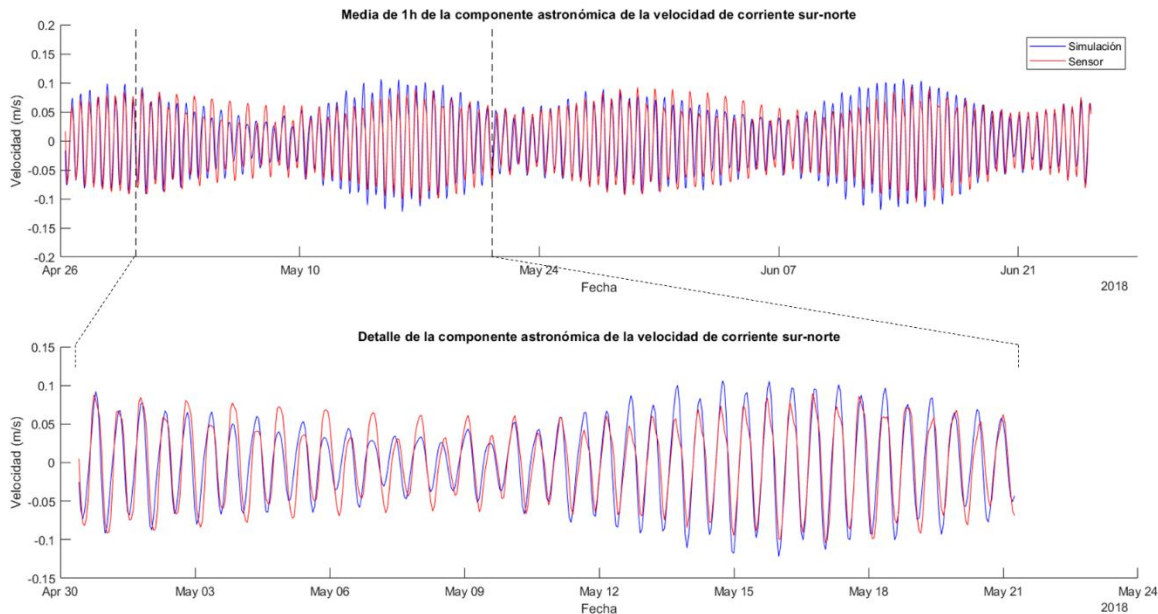


Figura 4.31. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de las señales de las predicciones del modelo con las observaciones del sensor de la componente Sur-Norte de la velocidad de corriente de la marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

	R	ECM	Rango de valores
<b>Componente Sur-Norte astronómica</b>	<b>0.91</b>	<b>0.0004</b>	<b>(-0.15,0.12)</b>

Tabla 4.15. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales de la componente Sur-Norte astronómica. Fuente: Elaboración propia

Para finalizar el análisis, se muestran unas rosas de corrientes correspondientes a las dos mareas, meteorológica y astronómica; de las predicciones del modelo y de las observaciones del sensor.

Para la marea meteorológica (Figura 4.32), el modelo predice una dirección principal hacia el Norte y otra dirección (menos frecuente, pero con valores de corriente altos) hacia el Sureste mientras que las observaciones del sensor muestran un abanico de direcciones de alta frecuencia desde el Nordeste hasta el Sureste, y otro abanico de menor frecuencia hacia las demás direcciones.

Respecto a la marea astronómica (Figura 4.33) la predicción se acerca bastante a las observaciones del sensor, marcando esta primera una dirección principal a lo largo del eje Norte-Sur, de igual frecuencia e intensidad en ambas direcciones mientras que las observaciones muestran una dirección más frecuente e intensa hacia el Sureste y un pequeño abanico menos frecuente e intenso que cubre desde el Norte hasta el Noroeste.

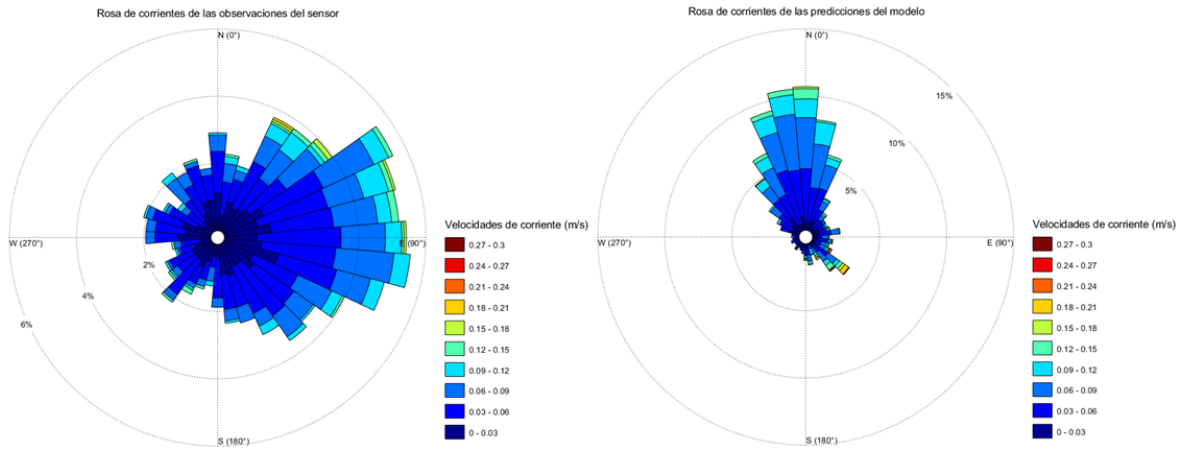


Figura 4.32. Comparación de las rosas de corrientes de las observaciones del sensor (izquierda) y de las predicciones (derecha) correspondientes a la componente de marea meteorológica. Fuente: Elaboración propia.

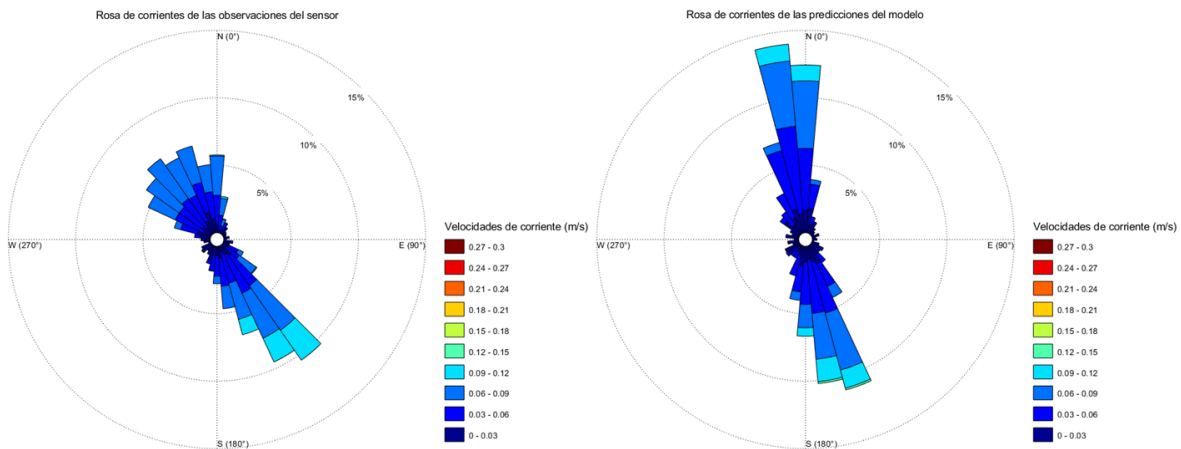


Figura 4.33. Comparación de las rosas de corrientes de las observaciones del sensor (izquierda) y de las predicciones (derecha) correspondientes a la componente de marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

## NIVEL DEL MAR

Se ha considerado lo mismo que se explica en el mismo subapartado de capítulo 4.1 respecto a la altura tomada para hacer comparables las dos señales. En la Figura 4.34 se muestra una comparativa entre las dos series de datos, predicciones y observaciones. Se



puede observar que la señal de la predicción se ajusta muy bien a la señal de las observaciones del sensor a pesar de que la primera esté desplazada hacia valores de nivel del mar más negativos. A pesar de esto, la correlación es muy alta ( $R = 0.96$ ) y el error es de  $ECM = 0.1986$  (ver Tabla 4.16).

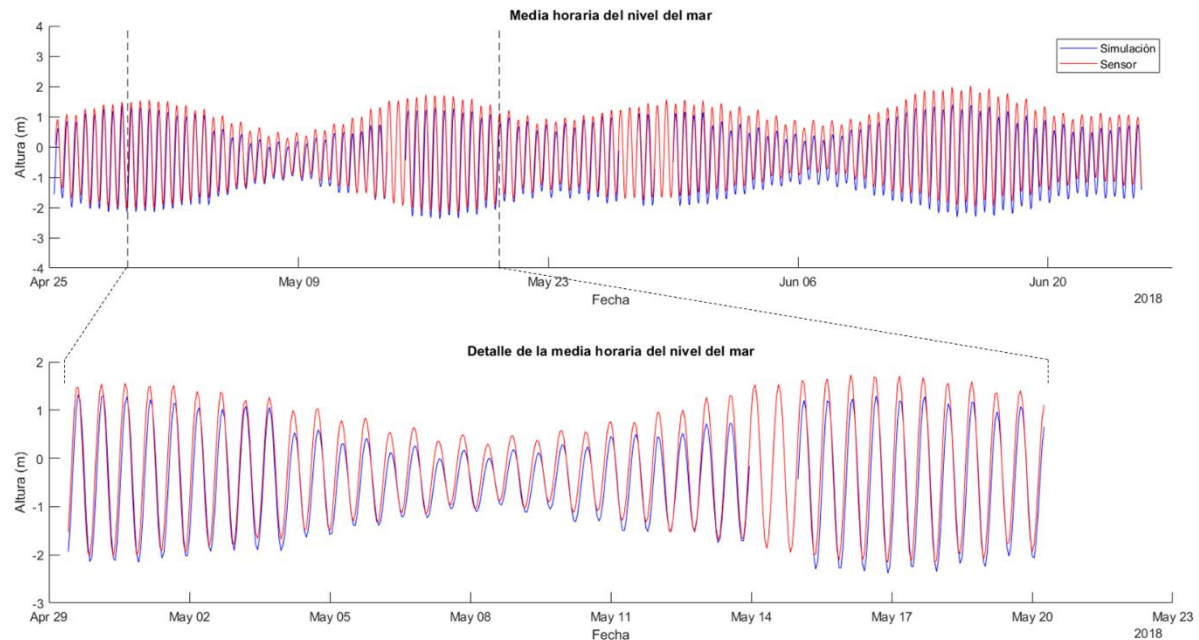


Figura 4.34. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de las señales de las predicciones del modelo con las observaciones del sensor del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

	R	ECM	Rango de valores
<b>Nivel del mar</b>	<b>0.96</b>	<b>0.1986</b>	<b>(-2.1,2)</b>

Tabla 4.16. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para las dos series del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

Al proceder con la descomposición del nivel del mar por marea astronómica y residuo apareció otra vez el problema de no eliminación de todos los armónicos, por tanto, en línea con la metodología seguida hasta ahora, se han propuesto una serie de medias móviles para tratar de eliminar el armónico, que se puede ver en la Figura 4.35.

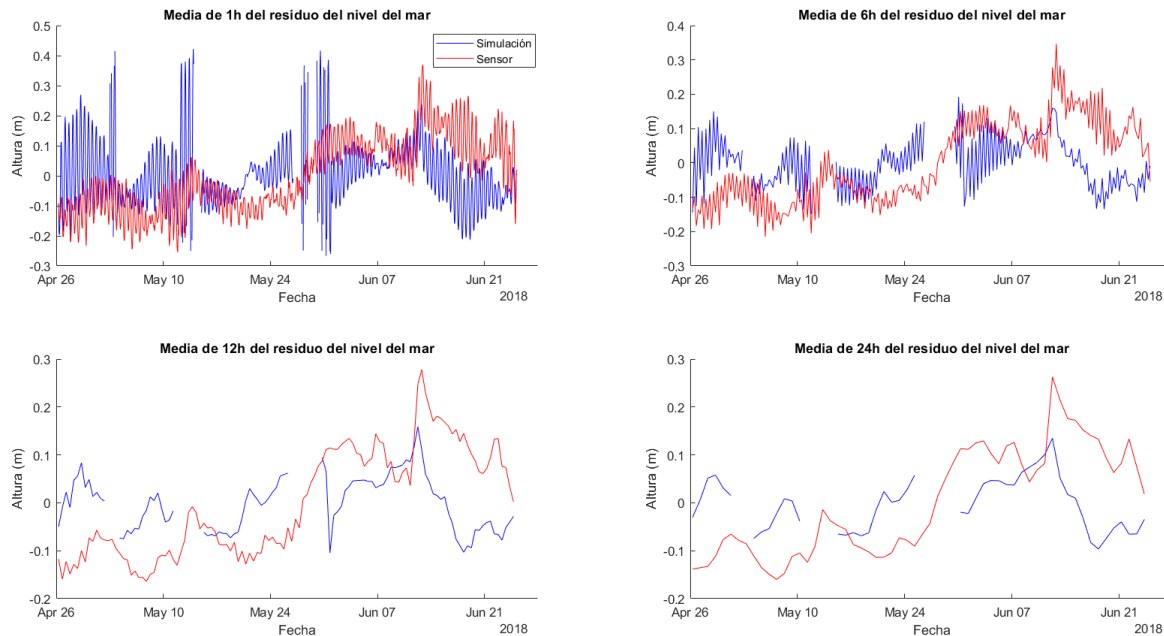


Figura 4.35. Residuo de la descomposición del nivel del mar. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 4.35.a. Media de 1 hora, 4.35.b. Media de 6 horas, 4.35.c. Media de 12 horas y 4.35.d. Media de 24 horas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.35 se puede ver que a partir de la media móvil de 12 horas ya se eliminan todos los armónicos. En la Figura 4.35.a, en la señal de la predicción, aparecen cuatro picos muy marcados que al pasar la media de 6 horas desaparecen y que no están reproducidos en la señal de las observaciones de sensor. Obviando esto, en general la predicción no se ajusta mal a lo observado por el sensor; en la Figura 4.35.c, correspondiente a la media móvil de 12 horas, a pesar de que los valores no coincidan, las dos señales siguen la misma tendencia en la mayoría de los puntos.

Las correlaciones y errores para cada caso se muestran en la Tabla 4.17.

Residuo del nivel del mar	Media de 1h	Media de 6h	Media de 12h	Media de 24h
<b>R</b>	<b>0.14</b>	<b>0.18</b>	<b>0.21</b>	<b>0.22</b>
<b>ECM</b>	<b>0.0233</b>	<b>0.0182</b>	<b>0.0144</b>	<b>0.0143</b>
<b>Rango de valores</b>	<b>(-0.3,0.41)</b>	<b>(-0.2,0.35)</b>	<b>(-0.18,0.3)</b>	<b>(-0.15,0.25)</b>

Tabla 4.17. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para medias móviles diferentes de las dos señales del nivel del mar del residuo. Fuente: Elaboración propia.

A medida que aumenta la media móvil, la correlación también. El mejor resultado se genera para la media de 24 horas, en el que se puede ver que las predicciones siguen la tendencia de crecimiento y decrecimiento del nivel del mar marcado por las observaciones. No

obstante, el valor máximo de correlación corresponde a la media de 24 horas, con una correlación de  $R = 0.22$ , no demasiado alta.

Finalmente, se muestra la comparación de la marea astronómica e la Figura 4.36:

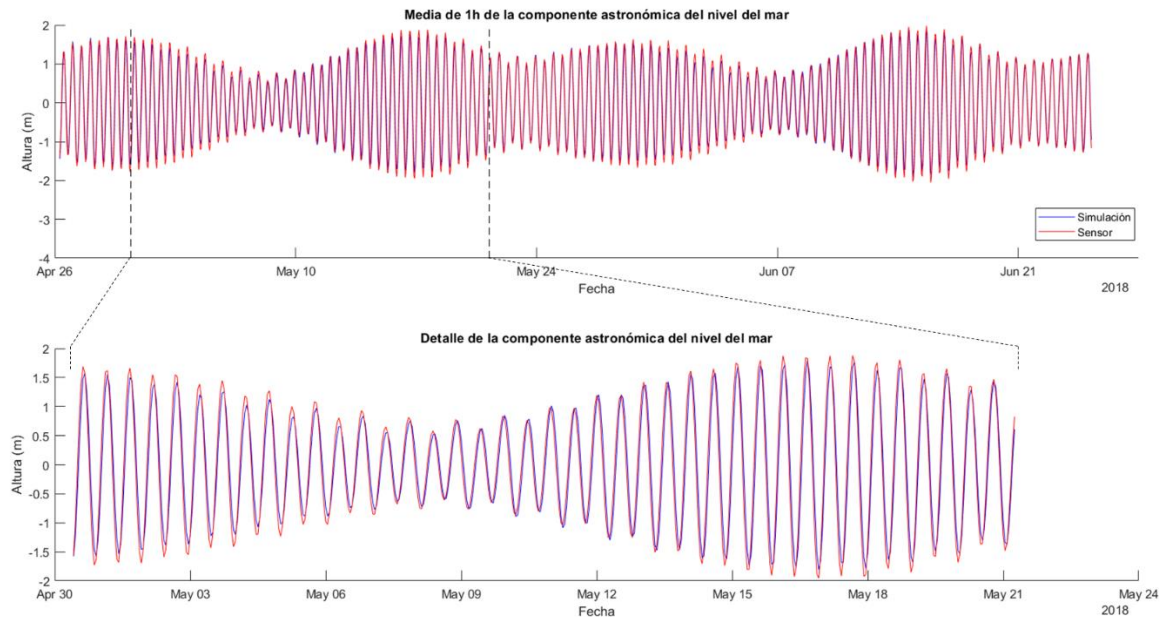


Figura 4.36. Comparación (arriba) y detalle (abajo) de las señales de las predicciones del modelo con las observaciones del sensor del nivel del mar de la marea astronómica. Fuente: Elaboración propia.

Componente astronómica	R	ECM	Rango de valores
Nivel del mar	0.97	0.0626	(-2,2)

Tabla 4.18. Relación de las correlaciones y los errores cuadráticos medios para las dos series de la componente astronómica del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el modelo a lo largo de toda la serie predice con mucha exactitud la señal de la componente armónica del nivel del mar, dando valores de amplitud mínimamente más bajos. La correlación es muy alta, de  $R = 0.97$  y el error es  $ECM = 0.0626$  (ver Tabla 4.18). Para finalizar, se muestra un análisis de frecuencias del nivel del mar, en el que todos los constituyentes muestran valores muy cercanos en las observaciones y en las predicciones del modelo (Figura 4.37).

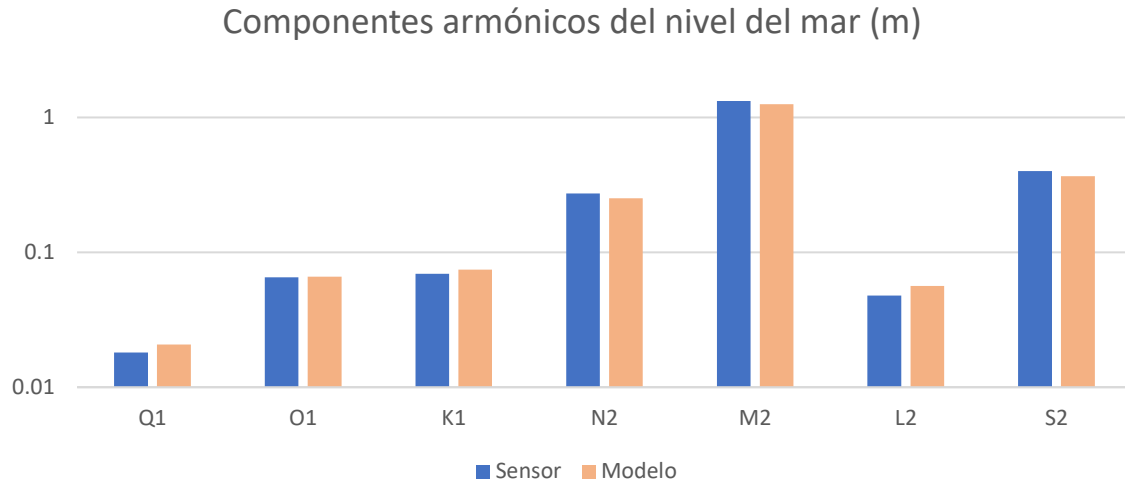


Figura 4.37. Componentes armónicos del nivel del mar. Fuente: Elaboración propia.

## 5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Dado que las predicciones del modelo están fuertemente influenciadas por la batimetría usada en éste, se ha procedido a comparar las profundidades a las que los sensores se encuentran proporcionadas en los informes de campaña con la batimetría del modelo. Se han tomado las coordenadas de los sensores que venían dadas en los informes de campaña y se han usado para poder encontrar la localización de los sensores en el mapa de la batimetría del modelo obteniendo la profundidad correspondiente en el modelo. En la Figura 5.1 se muestran las localizaciones en el mapa de la batimetría del modelo y en la Tabla 5.1 se muestra una comparativa entre las profundidades de los sensores indicadas en las campañas y las profundidades de los sensores obtenidas con la batimetría usada por el modelo.

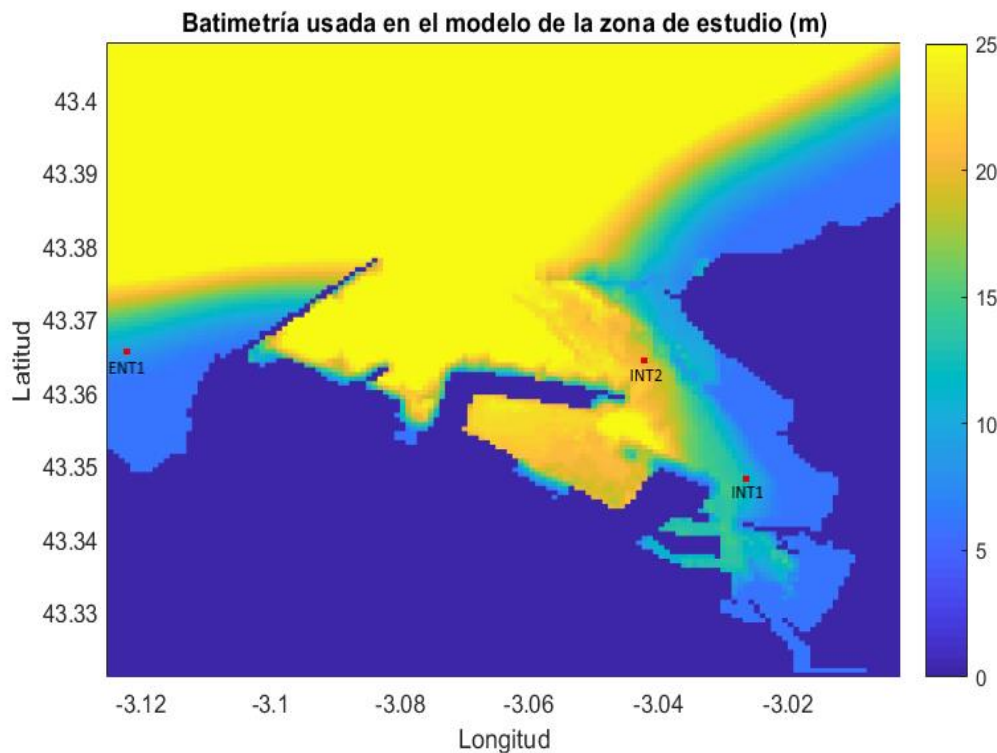


Figura 5.1. Batimetría usada por el modelo. Para una mejor visualización, se ha limitado a 25 m la profundidad máxima. En rojo las localizaciones de los sensores. Fuente: Elaboración propia.

Profundidad (m) de los sensores según:	INT2	ENT1	INT1
Informes de campañas	20.5	22.9	12.9
Batimetría del modelo	19.9	8.8	12.1

Tabla 5.1. Comparación de las profundidades de los sensores entre las proporcionadas en los informes de campaña y las correspondientes a la batimetría usada por el modelo. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5.1 se puede ver que para el caso de los sensores del interior del puerto; INT1 y INT2, hay una pequeña diferencia en la profundidad que en los dos casos es menor a 1 metro. En cambio, en el caso del sensor exterior, ENT1, la diferencia de profundidad es enorme, de más de 14 metros. Esto también se puede ver en la Figura 5.1; toda la batimetría circundante a la localización del sensor es no mayor de 10 metros.

Para establecer un orden coherente en la discusión de los resultados, se va a seguir el marcado en el capítulo anterior; por sensores.

## 5.1. INT2

En el capítulo 4.1, en las primeras figuras en las que se comparaban las observaciones del sensor y las predicciones del modelo de ambas componentes de la corriente, la gran diferencia era la disparidad de las amplitudes de las señales, en la que el modelo subpredecía en gran medida la amplitud medida por el sensor (Figuras 4.2, 4.3). La correlación de la componente Oeste-Este era notablemente mayor a la correlación de la componente Sur-Norte (Tabla 4.1). Como se puede observar en la Figura 5.1, el sensor se encuentra cerca de un muelle. Este muelle con total seguridad afectará al régimen de corrientes del puerto. Dado que la ubicación del sensor teórica en el mapa de batimetrías usada por el modelo puede ser que no sea exacta, implicaría que las predicciones del modelo no fueran también del todo correctas. En el caso del sensor INT2, una variación de la ubicación hacia el muelle implicaría una reducción en la intensidad de las corrientes en las dos componentes, que es justo lo que ocurre en este sensor. La correlación no es mala dado que los cambios de régimen son menos susceptibles a este problema.

Este fenómeno se puede ver también en las rosas de corrientes, que son bastante similares en cuanto a direcciones principales de corrientes (Figura 4.5). La rosa de corrientes proporcionada por el sensor marcaba una dirección más frecuente e intensa un poco más hacia el Sur que la proporcionada por el modelo. La diferencia de direcciones se puede explicar también con la premisa de antes ya que, si el sensor es más cercano al borde Oeste del estuario, las corrientes seguirán de forma preferencial a las isóbatas de ese lado y mostrarán direcciones más hacia el Este.

Respecto a la descomposición entre marea astronómica y residuo, la parte del residuo en las dos componentes Oeste-Este (Figura 4.6) y Sur-Norte (Figura 4.8) el modelo subpredecía la intensidad mostrada por el sensor. No obstante, como ocurría anteriormente, las correlaciones entre las series no eran malas para este caso también, en concreto para la componente Oeste-Este (Tabla 4.2). En cambio, la correlación de la componente Sur-Norte era muy baja comparada con la Este-Oeste (Tabla 4.4). Esto significa que el modelo es capaz de predecir bien los cambios de la velocidad de corriente no mareal de la componente Oeste-Este, pero mal los cambios de la componente Sur-Norte. Las rosas de corrientes mostraban un comportamiento parecido al indicado para la señal completa (Figura 4.10):



las simulaciones del modelo mostraban una dirección principal más hacia el Norte que lo observado por el sensor y una intensidad menor. A la corriente residual le puede afectar la descarga de agua dulce de la ría (estratificación vertical, con flujos superficiales de salida, o incluso con variabilidad horizontal, con el flujo de agua dulce de salida enganchada al margen derecho) o el estado del viento (los vientos utilizados para forzar el modelo tienen una resolución de 4km, completamente inadecuada para poder representar algunos de los fenómenos atmosféricos presentes cerca de la costa y su variabilidad espacial). Por falta de datos, no se ha podido establecer un motivo claro para la diferencia entre las corrientes residuales.

En relación con la parte astronómica de la corriente, la predicción de la amplitud de la señal hecha por el modelo de la componente Oeste-Este (Figura 4.7, Tabla 4.3) era bastante inferior a la medida por el sensor, pero la predicción hecha para la componente Sur-Norte (Figura 4.9, Tabla 4.5) era muy buena. Debido a la situación del sensor en la geografía del puerto, la predicción mareal de la corriente Sur-Norte es más fácil de hacer que la predicción de la componente Oeste-Este dado que ésta última dirección es perpendicular a la dirección de entrada a la bahía.

Resumiendo lo dicho hasta ahora, las intensidades de la componente Oeste-Este están fuertemente subpredichas por el modelo, pero los cambios de velocidad de corriente no, cosa que se traduce en correlaciones altas comparadas con las obtenidas en la componente Sur-Norte; en la que el modelo ajusta mejor las intensidades de velocidad de corriente (sobre todo para la parte astronómica) pero falla al predecir los cambios de velocidad.

Respecto al nivel del mar, la predicción hecha por el modelo era muy buena a pesar de proporcionar valores ligeramente más negativos que los medidos por el sensor. Al dividir la señal en parte astronómica y meteorológica se podía ver que los valores negativos se producían en la marea meteorológica (Figura 4.13) ya que la predicción de la astronómica (Figura 4.14) era casi perfecta (fallaba en el armónico L2 de la Figura 4.15). No obstante, cabe remarcar que la predicción de la marea meteorológica era muy buena, sobre todo al principio de la serie de datos.

## 5.2. ENT1

En la Tabla 5.1 se puede ver que la diferencia de profundidades entre la proporcionada por los informes y la usada por el modelo es del orden de 14 metros, muy grande. Además, el píxel correspondiente al sensor ENT1 se encuentra en el contorno del dominio numérico del modelo (diferente al mapa de colores mostrado en la Figura 5.1). Cabe añadir también que este sensor se encuentra muy cerca del arranque del dique.

Esta gran diferencia de profundidades se debe a que el modelo de predicciones de alta resolución proporcionado por el SAMOA se centra en el interior del puerto. Esto implica

que la batimetría usada en el modelo del interior sea de alta resolución, pero la del exterior esté interpolada de otra batimetría de menor resolución, dado que la base de datos de la zona costera no es muy buena. Esto se puede ver en la Figura 5.1, donde los cambios de profundidad de la zona exterior son muy suaves y uniformes.

Como se ha comentado en el capítulo 4.2, la localización e instalación del sensor ENT1 se modificó substancialmente durante un temporal el 11/05/2018, por tanto, los datos usados del sensor para la validación son sólo hasta el 09/05/2018.

Partiendo de esto, se vio en el capítulo 4.2 al comparar las señales de velocidad de corriente de las observaciones del sensor y de las predicciones del modelo que las diferencias entre éstas eran pequeñas en ambas componentes Oeste-Este y Sur-Norte (Figura 4.19). La amplitud de la señal predicha de ambas componentes era muy parecida a la amplitud de la señal observada por el sensor y a rasgos generales las variaciones de la velocidad también. La correlación de la componente Oeste-Este era mejor que la correlación de la componente Sur-Norte. Esto se debe a que el modelo es capaz de predecir mejor las pequeñas variaciones de la velocidad de la componente Oeste-Este que de la Sur-Norte. Una explicación a esto es que, como se puede observar en la Figura 4.21, que la dirección más frecuente de corriente y más intensa es justo hacia el Oeste, paralela a la costa, y esto facilita su predicción. En cambio, la componente Sur-Norte es perpendicular a la costa.

Las direcciones de la rosa de corriente (Figura 4.21) predichas por el modelo también se ajustan muy bien a las marcadas por las observaciones del sensor, por tanto, se puede afirmar que el modelo predice muy bien las velocidades

Respecto al nivel del mar, el modelo predice casi perfectamente lo observado por el sensor, aunque tiene una tendencia a dar valores más negativos, como en el caso del sensor INT2 (Figura 4.22).

### 5.3. INT1

El sensor INT1 es el sensor situado más hacia el interior del puerto que cualquiera de los demás. La diferencia de profundidades entre la batimetría del modelo y lo indicado por las campañas es del orden de 80 cm. Esta diferencia de profundidades puede provocar lo explicado en el apartado 5.3, que la localización teórica del sensor en el mapa del modelo no sea del todo correcta.

Como se ha indicado anteriormente en el capítulo 4.3, el modelo en este caso sobrepredecía ligeramente la velocidad de corriente de la en la componente Sur-Norte medida por el sensor. Si se observa el mapa de la Figura 3.1, se puede ver que el sensor está casi en línea vertical con el exterior del puerto; uniendo la desembocadura del abra con el océano, por lo que es de esperar que la componente Sur-Norte sea más importante que la componente Oeste-Este. Partiendo de esto, el modelo predice que esta componente (Sur-Norte) es

importante pero el sensor indica que está en línea con la componente Oeste-Este (Figuras 4.24 y 4.25). El modelo también predice unos pulsos para la componente Sur-Norte, sobre todo en los primeros días que no están correspondidos por lo medido por el sensor y no tienen relación con pulsos en la componente Oeste-Este. No obstante, la correlación de la componente Sur-Norte es mucho mayor, sobre todo al comparar los datos horarios (Tabla 4.11).

La ubicación del sensor sugiere que un pequeño desplazamiento en la línea Este-Oeste implique cambios importantes en los valores de velocidad de corriente, sobre todo para la componente Sur-Norte, que está directamente afectada por el muelle que se encuentra al Sur de la ubicación del sensor. Si la ubicación de la medida se mueve un poco hacia el Oeste, la profundidad aumenta de forma drástica y si la medida está cerca o lejos de esta zona de transición, los resultados pueden ser muy diferentes. Las diferencias de intensidad en las señales pueden deberse a este hecho. La alta correlación de la componente Sur-Norte se debe a que el modelo es capaz de predecir los cambios de velocidades de esta componente correctamente, a pesar de proporcionar valores mayores. En cambio, ocurre lo contrario para la componente Oeste-Este, en el que la correlación entre las series de datos es muy baja.

Al incorporar al análisis la división de la señal por armónicos, se pudo observar que, para el caso de la corriente residual, la predicción mejoraba substancialmente para la componente Oeste-Este (Figura 4.28, Tabla 4.12), pero empeoraba para la componente Sur-Norte (Figura 4.30, Tabla 4.14). El empeoramiento de esta última componente está estrechamente ligada con la corriente que genera la descarga de agua dulce de la ría. Una mala localización de la batimetría en el modelo puede generar que la corriente inducida por el agua dulce no se prediga correctamente. La mejora de la predicción de la componente Oeste-Este residual respecto a la señal original es debida a que la predicción de la corriente mareal de esta componente es muy mala (Figura 4.29, Tabla 4.13). Este mal ajuste se puede deber a que la corriente Oeste-Este es perpendicular a la línea de entrada de agua. En cambio, la predicción de la componente Sur-Norte mareal es perfecta (Figura 4.31, Tabla 4.15).

La rosa de corrientes de la señal original predicha por el modelo (Figura 4.27) mostraba una dirección muy frecuente hacia el Norte y otra menos frecuente pero muy intensa hacia el Sureste, que coincide con la dirección a la playa más cercana. La rosa de corrientes del sensor, en cambio mostraba mucha más variabilidad de direcciones, pero sobresalía una dirección Sureste (la más frecuente) y otra hacia el Norte. La diferencia entre ambas rosas es bastante grande. El modelo falla al no ser capaz de predecir toda esta variabilidad. Al descomponer las señales y dibujar las rosas de corriente se puede ver, en primer lugar, que las rosas de corrientes del residuo meteorológico son completamente distintas. El modelo predecía una componente Norte muy frecuente que probablemente sea debida al agua aportada por la ría y otra no muy frecuente pero muy intensa direccionada a la playa mientras que el sensor mostraba una dirección principal hacia el Este, pero con mucha

variabilidad (Figura 4.32). En este caso se puede afirmar que el sensor parece que no tiene en cuenta la corriente generada por la ría y que el modelo no tiene en cuenta la corriente hacia la costa que pueda generar un viento soplando dentro del puerto.

Debido a la baja resolución de los archivos de forzamiento meteorológico que se proporcionan al modelo proporcionan sólo uno o dos datos de viento para todo el puerto. Esto implica que las corrientes generadas dentro del puerto por el viento interior no se tengan del todo en cuenta. Esto es lo que puede suceder cuando se habla en el parágrafo anterior de que el modelo no muestra las corrientes hacia la costa.

Finalmente, respecto al nivel del mar, como en los otros dos sensores, el modelo predice muy bien lo indicado por el sensor y también falla al dar valores más negativos (Figura 4.34), producidos por la marea meteorológica (Figura 4.35) ya que el ajuste de la marea astronómica es muy bueno (Figuras 4.36 y 4.37).

## 6. CONCLUSIONES

La inclusión del modelo de predicción de la iniciativa SAMOA, que se ha validado en este trabajo, ha permitido a Puertos del Estado proporcionar a las autoridades portuarias de todo el país una herramienta sólida de trabajo, para obtener información hidrodinámica del interior de cada puerto y para poder tomar las mejores decisiones a la hora de gestionar el puerto.

El objetivo principal de este documento ha sido establecer una metodología para validar el modelo de predicción dentro del puerto de Bilbao, y a la vez usarla. La metodología seguida ha permitido realizar un análisis, no sólo de comparación de datos y obtención de resultados, sino también dar ciertas explicaciones a situaciones en las que las predicciones del modelo distaban mucho de los datos reales. Disponer de tres puntos diferentes para la validación ha permitido contrastar los resultados obtenidos en cada caso y llegar a unas conclusiones globales sobre el funcionamiento general del modelo dentro y fuera del puerto de Bilbao.

La primera conclusión que se ha obtenido es que el modelo es capaz de predecir de una manera veraz y correcta el nivel del mar. Las validaciones hechas en los tres puntos han proporcionado correlaciones mayores a 0.95; muy altas. No obstante, también en los tres casos las predicciones eran ligeramente más negativas que las medidas por los sensores. Al descomponer la señal en marea astronómica y meteorológica, se observó que la predicción de la marea astronómica en los tres casos era casi perfecta, con correlaciones mayores a 0.97. Por tanto, se concluyó que este desfase hacia valores más negativos de la señal original de la predicción se debía a fallos en la predicción de la marea meteorológica. En efecto, las validaciones de la marea meteorológica eran peores que para la marea astronómica a pesar de que éstas primeras también tenían una validación muy buena. Se ha llegado a la conclusión de que el modelo proporciona predicciones más negativas del nivel del mar que las reales.

Respecto a la validación de las corrientes, la mejor validación ha sido para el sensor del exterior del puerto. La predicción del modelo en este punto estaba condicionada por dos factores, el primero era que se encontraba en el contorno del mapa de colores generado por el modelo; el segundo factor era que la batimetría de la zona aplicada al modelo no era del todo correcta. Los datos de este sensor también estaban limitados por los problemas que experimentó durante su funcionamiento. A pesar de todo esto, la validación proporcionó una correlación de 0.44 para la componente Este y de 0.28 para la Norte y las direcciones principales de corriente predichas por el modelo también se ajustaron bien.

Los sensores interiores del puerto presentaron validaciones en general peores. Esto se puede deber a que la zona exterior sea más fácil de predecir debido a que es más energética y menos condicionada por construcciones. Las principales diferencias entre las predicciones y las observaciones de los sensores eran en la amplitud de las señales. Para el caso del

sensor más hacia el exterior del puerto, los valores de las predicciones eran muy inferiores a los medidos por el sensor y ocurría al revés en el otro. No obstante, las correlaciones al comparar las series de datos no eran malas (0.5 para la componente Este y 0.38 para la componente Norte del sensor más exterior). Se concluyó que esto ocurría ya que el modelo era capaz de predecir correctamente los cambios de velocidad, pero no la amplitud. Otro fenómeno que se observó fue que la componente Este de la corriente generada por la marea no se predecía correctamente en los sensores interiores. Como norma general, ésta se subpredecía o se fallaba en la predicción completamente. Se concluyó que este error era inherente a la geografía del puerto ya que la dirección Este es perpendicular a la dirección de entrada al estuario del Nervión; el modelo fallaba en este tipo de situaciones.

La última conclusión obtenida fue que los fallos en las predicciones se debían en gran medida a la batimetría usada por el modelo. Una mala aplicación de ésta podía suponer que la corriente que se quería comparar estuviese desplazada ligeramente, y al extraerla del mapa de colores generado por el modelo se obtuviesen valores que no correspondían al punto buscado.

Por tanto, se concluye que el modelo es capaz de predecir correctamente el nivel del mar, tanto dentro como fuera del puerto, pero las predicciones de las corrientes no son del todo correctas, a pesar de que en algunos casos se consigan valores muy parecidos a los reales.

La metodología descrita en este trabajo para la validación del modelo aplicado en el puerto de Bilbao se puede replicar para cualquier otro puerto en el que SAMOA esté operativo. Solo es necesario contar con una red de sensores que tomen medidas de velocidades de corriente y nivel del mar.

En la actualidad la demanda de información actualizada y predicha de datos de variables hidrodinámicas está creciendo mucho y es muy importante que esta información sea veraz y de calidad. El procedimiento desarrollado en este documento permite detectar errores en las predicciones del modelo y acotarlos, mostrando las carencias y los puntos fuertes del éste y proporciona una pequeña mejora para la ingeniería civil del mar.

## **FUTURAS LÍNEAS DE MEJORA**

Las líneas de mejoras propuestas se van a dividir en dos tipos: líneas de mejora para mejorar el trabajo de validación y para mejorar el modelo de predicción.

Respecto a las líneas de mejora para el trabajo de validación, se quiere destacar: disponer datos de intensidad y dirección de viento horarios, datos de descarga de agua dulce de la ría, datos de temperatura de la superficie y datos medidos de salinidad en el puerto.

- Disponer de datos de intensidad y dirección de viento ayudaría en la validación para estudiar picos en la señal producida por las observaciones del sensor y para tener



en cuenta episodios de viento Sur al analizar las corrientes. Estos datos serían útiles para explicar situaciones en la que los datos obtenidos por el sensor distaran mucho de los predichos por el modelo. Dado que el forzamiento atmosférico aplicado al modelo es de baja resolución, puede suceder que el modelo no tenga en cuenta todos los vientos que realmente están actuando.

- Los datos de descarga de agua dulce son útiles también para caracterizar corrientes medidas por el sensor, sobre todo hacia el Norte. Ayudaría a analizar de una manera más profunda las rosas de corrientes generadas por los datos de los sensores.
- Los datos de temperatura medidos en superficie permitirían establecer otra variable para la validación del modelo. En el caso de este trabajo, se tenían datos de temperatura, pero correspondientes a la profundidad a la que el sensor está fondeado.
- Contar con datos de salinidad del puerto en los sensores permitiría, además de establecer otra variable de validación, ver hasta qué punto los sensores están afectados por la corriente generada por la descarga de la ría, estableciendo una relación salinidad-corriente.

Posibles mejoras para el modelo de predicción son:

- Mejoras en el forzamiento atmosférico: Los datos proporcionados por AEMET mediante las aplicaciones HNR y ONR son de baja resolución para la aplicación al modelo de escala portuaria. Esto implica que, para todo el puerto, sólo haya uno o dos datos para el forzamiento oceánico. El régimen de vientos dentro de un puerto es muy diferente para diferentes puntos del puerto, y estos vientos diferentes pueden generar corrientes dentro de éste, sobre todo en días de temporal. Por tanto, una mejora sería aumentar la resolución de los archivos de forzamiento atmosférico usados.
- Mejora de la batimetría usada en el modelo: Usar datos reales de batimetría en el puerto mejoraría la predicción de la corriente para ciertos puntos y también usar batimetría real en la zona exterior del puerto, para evitar diferencias grandes en predicciones de la zona exterior.
- Mejoras en el forzamiento de agua dulce: Los aportes de agua dulce se introducen a partir de una serie climática. La utilización de datos de predicción, o incluso de datos medidos (con uno o dos días de retraso) podrían suponer un salto cualitativo importante en periodos de fuerte descarga.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Fanjul, E., Pérez Gómez, B., & Rodríguez Sánchez-Arévalo, I. (2001). Nivmar: A storm surge forecasting system. *Scientia Marina*, 65 (Suppl. 1), 145-154.
- Álvarez Fanjul, E., Sotillo, M., Pérez Gómez, B., García Valdecasas, J., Pérez Rubio, S., Rodríguez Dapena, Á., . . . Sánchez-Arcilla, A. (2018). The SAMOA initiative: Operational Oceanography at the service of the ports. *New Frontiers in Operational Oceanography*, 729–736.
- Cateura, J., & Sospedra, J. (2018). *Asistencia técnica para el seguimiento ambiental del proyecto de extracción de arenas en el sector Norte de la zona II de la APB (2016-2020) con especial vinculación al proyecto del espigón central*.
- Cerralbo, P., Grifoll, M., Espino, M., & Sánchez-Arcilla, A. (s.f.). *Implementación v0 y v1 de los modelos de predicción de corrientes para el puerto de Bilbao*.
- Darbra, R., Pittam, N., Royston, K., Darbra, J., & Journee, H. (2009). Survey on environmental monitoring requirements of European ports. *Journal of Environmental Management* 90, 1396–1403.
- Grifoll, M., Del Campo, A., Espino, M., Mader, J., González, M., & Borja, Á. (2013). Water renewal and risk assessment of water pollution in semi-enclosed domains: Application to Bilbao Harbour (Bay of Biscay). *Journal of Marine Systems* 109-110, 241-251.
- Grifoll, M., Fontán, A., Ferrer, L., Mader, J., González, M., & Espino, M. (2009). 3D hydrodynamic characterisation of a meso-tidal harbour: The case of Bilbao. *Coastal Engineering* 56, 907–918.
- Grifoll, M., Jordà, G., Borja, Á., & Espino, M. (2010). A new risk assessment method for water quality degradation in harbour domains, using hydrodynamic models. *Marine Pollution Bulletin* 60, 69–78.
- Juza, M., Mourre, B., Renault, L., Gómara, S., Sebastián, K., Lora, S., . . . Tintoré, J. (2016). SOCIB operational ocean forecasting system and multi-platform validation in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Operational Oceanography*, 9:sup1, s155-s166.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., & Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56, 394–415.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Computational Geosciences*, 28, 929-937.
- Sotillo, M., Cailleau, S., Lorente, P., Levier, B., Aznar, R., Reffray, G., . . . Álvarez-Fanjul, E. (2015). The MyOcean IBI Ocean Forecast and Reanalysis. *Journal of Operational Oceanography*, 8:1, 63-79.
- Sotillo, M., Cerralbo, P., Lorente, P., Espino, M., Sanchez-Arcilla, A., & Álvarez-Fanjul, E. (2019). Coastal ocean forecasting in Spanish ports: the SAMOA operational service. *Journal of Operational Oceanography*.